



Universitat de Girona

**CONTROL BASAT EN LÒGICA DIFUSA PER
SISTEMES DE FANGS ACTIVATS. DISSENY,
IMPLEMENTACIÓ I VALIDACIÓ EN EDAR
REALS**

Mireia FITER i CIRERA

**ISBN: 84-689-9005-1
Dipòsit legal: GI-653-2006**



Universitat de Girona

Departament d'Enginyeria Química Agrària i
Tecnologia Agroalimentària

Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental

Control basat en Lògica Difusa per Sistemes de Fangs Activats. Disseny, Implementació i Validació en EDAR reals.

Memòria presentada per Mireia Fiter i Cirera,
per optar al grau de Doctor per la Universitat de Girona.

Girona, 2006

Directors: Dr. Ignasi Rodríguez-Roda Layret
Dr. Jesús Colprim Galceran

IGNASI RODRÍGUEZ-RODA LAYRET i JESÚS COLPRIM GALCERAN,

Professors del Departament d'Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia Agroalimentària de la Universitat de Girona

CERTIFIQUEN

Que la llicenciada Mireia Fiter i Cirera ha dut a terme, sota la seva direcció, el treball que, amb el títol *“Control basat en Lògica Difusa per Sistemes de Fangs Activats. Disseny, Implementació i Validació en EDAR reals”*, presenta en aquesta memòria, la qual constitueix la seva Tesi per a optar al Grau de Doctor per la Universitat de Girona.

I perquè en prenguem coneixement i tingui els efectes que correspongui, presentem davant la Facultat de Ciències de la Universitat de Girona l'esmentada Tesi, signant aquesta certificació a

Girona, 24 de gener del 2006

Ignasi Rodríguez-Roda Layret

Jesús Colprim Galceran

M'has ensenyat a caminar,

m'has ensenyat a lluitar.

T'admiro, t'estimo.

A MON PARE

AGRAÏMENTS

La plana en blanc pels agraïments!, no m'ho crec. Després de mesos de redacció de tesi, només em resta una de les coses més importants: com transmetre en quatre línies mal escrites el meu GRÀCIES més sincer per a tots vosaltres. Amb més o menys gràcia literària, aquí van els agraïments, de tot cor.

El primer dels agraïments, com no pot ser d'una altra manera, va pels meus directors. Jesús, gràcies per la teva ajuda, per saber com enfocar i organitzar les coses en un obrir i tancar d'ulls quan les coses semblaven encallar-se, gràcies per ser-hi, no només durant la realització de la tesi sinó al llarg dels cinc anys compartits en el Lequia. Ignasi, gràcies pels teus consells, per la teva manera de treballar i sobretot per aguantar-me en tot moment. Durant aquests anys hem compartit moments d'optimisme, de pessimisme..., però el més important per a mi és que els hem compartit. T'agraeixo haver confiat en mi i sobretot deixar-me confiar en tu. Gràcies per recolzar-me en tot moment, donar-me un copet a l'espatlla quan m'ha fet falta i una que altra estirada d'orelles quan havia d'espavilar. A cau d'orella, de doctorand a director: gràcies per ser més que un director.

Agraeixo també l'ajuda rebuda per tots els membres del LEQUIA. Manel, gràcies per introduir-me en el món de la recerca i de la lògica difusa (finalment ho hem aconseguit! Una tesi 'difusa!'). Maria, Marilós, August i Miquel, gràcies per estar sempre disposats a donar un bon consell, una ajuda. Una menció especial per a tu Quim. Ets com el 'tercer hombre' - 'tercer director'. Gràcies pels bons consells, perquè per molta feina que puguis tenir, sempre trobes un moment per donar-me un cop de mà.

Continuant amb la gran família lequiana, vull expressar la meva gratitud a tota aquella gent que durant aquest cinc anys han hagut d'aguantar les meves intrusions fortuïtes dins el laboratori. Especialment, gràcies a tu Gemma. Ets l'eficiència personificada. Moltíssimes gràcies per la teva inestimable ajuda, sobretot en les inacabables campanyes de mostreig (que no han estat precisament poques).

I com no, em resta expressar la meva gratitud al sector lequià més 'jove i currante': a la GUARDERIA (I i II). Anna, Clàudia, Helio, Jordi, Lluís, Mon, Peter, Ramon, Sebas i Xavi. Com dir-vos en paraules que sense vosaltres, la feina feta durant la realització de la tesi, no tindria el significat que té. De tots aquests anys de doctorat, una de les millors vivències ha estat poder compartir despatx, dinars, esquaix (i molt de temps...) amb tots vosaltres. Gràcies per aguantar-me, sé que la Mireia pot tenir dies de cables creuats en que no és fàcil aguantar-la... I això també va per la nova generació lequiana, entre ells, Hèctor, Marta, Carla, Ferran, Alba, Elena, ... i també pels 'ex-guarderia': J. Aumatell, J. Bartrolí, Uri, Teia, Esther, Christian, Gemma i una menció especial pel duo que considero més que 'excompanyes de guarderia': Núria i Elvira, gràcies per les xerrades compartides més enllà del món de la recerca.

Gràcies també a SISLTECH. Jaume, la teva ajuda, sempre tant eficient, m'ha facilitat molt el camí de la implementació de lògica difusa. Toni i Pere, sense vosaltres, la part pràctica d'aquesta tesi hauria estat com el

rosari de l'aurora. Gràcies per aguantar les meves demandes informàtiques a qualsevol hora, reconec que puc ser bastant pesadeta. En la vessant informàtica, també vull agrair l'ajuda rebuda per en Josep Antoni: amb la teva eficiència i ganes de fer feina, els inicis a Taradell van ser d'allò més motivant.

També vull expressar el meu agraïment al Consorci per a la Defensa de la Conca del Riu Besòs i, molt especialment a tu Àngel, per confiar en un projecte 'difús', per les hores dedicades. Sense tu, la feina feta a l'EDAR Granollers hauria estat impossible. De la mateixa manera, vull agrair també la col·laboració de Depuradores Osona SL. A en Jordi Viñas per estar sempre disposat a resoldre qualsevol problema tècnic, per l'interès demostrat i molt especialment a tu David, per la dedicació i la il·lusió demostrada, per la teva predisposició i fe cega en noves tècniques de control i sobretot, per poder comptar amb tu en qualsevol moment. Sense la teva ajuda i ganes de tirar endavant hauria estat impossible dur a terme part d'aquesta tesi.

Una secció molt important dels agraïments va adreçada als amics. Un 'gràcies' als amics de Girona per acompanyar-me durant aquests anys de doctorat. Per tirar una tesi endavant, cal tenir amistats com les vostres amb qui distreure's i compartir bons moments: les trobades culinàries durant aquests anys m'han ajudat a trobar-m'hi bé en terres gironines.... Xevi, Sílvia, Christian, Sílvia, Josep, Pablo, Sala, Lluís, Maria, Sebas... gràcies! I sí Luigi! te l'has guanyada!, una menció especial per a tu: company de despatx, amic gironí..., gràcies per ajudar-me quan ho he necessitat, gràcies per ser més que un company de feina, ets un bon amic.

Un agraïment també per les meves 'sectàries': Núria, Lúdia, Alba, Mon, Rosi, Anna, Raquel, Berta i Eva. Després de la llicenciatura, varem tirar per camins diferents, però continuem amb les nostres trobades sectàries. Parlar de com va la tesi i la feina que fas, ajuda més del que pot semblar a tirar endavant. Gràcies pel suport i els ànims. I inevitablement, un agraïment molt especial per a una persona molt especial. Això va per tu, Mon. Companya lequiana, 'sectària' i sobretot una gran amiga. Gràcies pel teu suport incondicional, per prestar-me sempre la teva ajuda, però sobretot gràcies per la teva amistat. Els records d'aquests anys de tesi, sempre aniran lligats amb els d'una bona amiga.

Continuant amb els amics, un agraïment als amics trempolins (Oriol, Marc, Núria, Quiri, Fer, Sandra, Toni, Txell i Vero) i als nous amics olivans (Càrol, Diego, Salva, Àlvar, Paco, Micó, Miguel, Ignacio, Mariola, Toni i Cristina) pels ànims donats durant la realització de la tesi i sobretot, per distreure'm i fer-me desconnectar, de tant en quan, de l'histericisme inherent de dur a terme una tesi doctoral. Un agraïment molt especial, de tot cor, a l'amiga de batalla de tota la vida, Txell, gràcies per tots aquests anys d'amistat, gràcies pels teus consells, gràcies per escoltar-me.

És imprescindible en l'elaboració de qualsevol tesi, un agraïment enorme a la família (cosins, tiets, cunyat, iaia, padrina...), especialment als meus pares, pel seu suport incondicional i la seva confiança cega en mi. Us estimo. Gràcies també a la meva germaneta, a la futura mamà, per aguantar els meus estats emocionals de muntanya russa, sobretot durant aquest estiu de redacció de tesi, t'estimo.

Una menció especial a la meva família gironina (Montxi, Esther, Edu, Meritxell, Jordi i la petitona Rut), gràcies per deixar-me ser okupa gironina durant tant de temps, escoltar-me sempre que ho he necessitat i donar-me bons consells. I com no, un agraïment a la meva nova família valenciana (Paco, Tere, Pere, Joan, Clara, uela, iaies, tios i cosins), gràcies per acollir-me amb els braços oberts, per animar-me durant el desenvolupament de la tesi i per l'ajut logístic informàtic del 'cunyaet'.

Finalment, l'últim dels agraïments és per qui ha sofert més la realització d'aquesta tesi. Va per tu Francesc, perquè et mereixes un monument per aguantar-me, animar-me, ajudar-me, estimar-me i estar al meu costat durant tot aquest temps. Gràcies pel temps compartit i pel temps a compartir.

Perquè *'em sentiré ningú si un dia no vens tu'*. T'estimo.

Girona, 23 de gener de 2006

Mireia Fiter

Aquest treball ha estat parcialment finançat pel projecte CICYT DPI2003-09392-C02-01 i amb el suport del Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació de la Generalitat de Catalunya i del Fons Social Europeu.

RESUM

Existeixen molts factors d'incertesa que afecten l'operació dels Sistemes de Fangs Activats (SFA) de les Estacions Depuradores d'Aigües Residuals (EDAR). Sovint, els mètodes clàssics presenten dificultats per controlar aquests SFA (reactor biològic i decantador) degut a la complexitat dels processos que s'hi produeixen. Cada vegada està prenent més força la possibilitat d'implementar estratègies de control basades en lògica difusa en lloc de sistemes de control convencionals. Els Sistemes de Control basats en Lògica Difusa (SCLD) combinen les regles d'un sistema expert amb una especificació flexible dels seus paràmetres de sortida. Aquests sistemes de control faciliten la integració del coneixement expert, a la vegada que eviten canvis abruptes dels paràmetres controlats.

En aquesta tesi es presenten dues propostes de SCLD, des del seu disseny fins a la seva implementació i validació en dues instal·lacions reals: l'EDAR Granollers i l'EDAR Taradell. El primer sistema de control va ser desenvolupat per controlar la concentració de sòlids en suspensió de l'efluent (SCLD_SS) mitjançant la manipulació del cabal de recirculació de fangs. El segon, va ser dissenyat per controlar l'eliminació biològica del nitrogen (SCLD_N) mitjançant la manipulació de l'aeració.

En el primer capítol de la memòria s'expliquen els conceptes bàsics necessaris per comprendre el desenvolupament dels dos SCLD. S'introdueix el concepte de SFA així com els processos biològics d'eliminació i de decantació que es produeixen en aquests sistemes. En aquest apartat es dóna especial èmfasi, amb una explicació més detallada, als processos que són objecte d'aquesta tesi (eliminació biològica del nitrogen i decantació). En aquest capítol també s'introdueixen els conceptes bàsics de la lògica difusa i dels SCLD. En un últim apartat es presenta el resum d'una revisió d'articles científics, relacionats amb l'aplicació de la lògica difusa en el camp del tractament d'aigües residuals, publicats en els últims 15 anys. En aquesta revisió es constata l'existència de molts treballs de simulació i de plantes pilots, mentre que encara són pocs els estudis d'implementació en EDAR reals.

En base a l'anàlisi realitzada dels antecedents de l'aplicació de la lògica difusa en el camp del tractament biològic de les aigües residuals, al capítol 2 s'estableixen els objectius d'aquesta tesi.

A continuació, en el capítol 3 es presenten els materials i mètodes, on s'explica el procediment sobre el qual es basa el disseny i implementació dels SCLD que es presenten en aquesta tesi; els programes de simulació que s'han utilitzat per a la seva avaluació, el protocol estàndard benchmark de comparació d'estratègies de control de SFA i la instrumentació necessària per implementar els SCLD.

Els capítols 4 i 5 exposen el treball realitzat per a dissenyar, implementar i validar el SCLD_SS a l'EDAR Granollers i el SCLD_N a l'EDAR Taradell, respectivament. Ambdós capítols presenten la mateixa estructura: presentació del capítol, definició dels objectius del sistema de control, descripció de l'EDAR on s'implementa el SCLD, desenvolupament d'uns índexs d'avaluació per quantificar el compliment dels objectius prèviament establerts, explicació detallada del procés de disseny del SCLD i la seva avaluació mitjançant estudis de

simulació, implementació del SCLD a l'EDAR i la seva validació i, finalment discussió del treball realitzat al llarg del capítol.

En el capítol 6 s'enumeren les principals conclusions obtingudes de la realització de la present tesi.

RESUMEN

Existen muchos factores de incertidumbre que afectan la operación de los Sistemas de Fangos Activos (SFA) de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR). A menudo, los métodos clásicos presentan dificultades para controlar estos SFA (reactor biológico y decantador) debido a la complejidad de los procesos que se producen. Cada vez, es más posible la implementación de estrategias de control basadas en lógica difusa en lugar de sistemas de control convencionales. Los Sistemas de Control basados en Lógica Difusa (SCLD) combinan las reglas de un sistema experto con una especificación flexible de sus parámetros de salida. Estos sistemas de control facilitan la integración del conocimiento experto además de evitar cambios abruptos de los parámetros controlados.

En esta tesis se presentan dos propuestas de SCLD, desde su diseño hasta su implementación y validación en dos instalaciones reales: la EDAR Granollers y la EDAR Taradell. El primer sistema de control fue desarrollado para controlar la concentración de sólidos en suspensión del efluente (SCLD_SS) mediante la manipulación del caudal de recirculación de fangos. El segundo, fue diseñado para controlar la eliminación biológica del nitrógeno (SCLD_N) mediante la manipulación de la aireación.

En el primer capítulo de la memoria se explican los conceptos básicos necesarios para comprender el desarrollo de los dos SCLD. Se introduce el concepto de SFA así como los procesos biológicos de eliminación y de decantación que se producen en estos sistemas. En este apartado se han explicado con más detalle los procesos que son objeto de la presente tesis (eliminación biológica del nitrógeno y decantación secundaria). En este capítulo también se introducen los conceptos básicos de la lógica difusa y de los SCLD. En un último apartado se presenta el resumen de una revisión de artículos científicos publicados en los últimos 15 años, relacionados con la aplicación de la lógica difusa en el campo del tratamiento de aguas residuales. En esta revisión se constata que existen muchos trabajos de simulación y de plantas pilotos, mientras que aún son pocos los estudios de implementación en EDAR reales.

En base al análisis realizado de los antecedentes de la aplicación de la lógica difusa en el campo del tratamiento biológico de las aguas residuales, en el capítulo 2 se establecieron los objetivos de esta tesis.

A continuación, en el capítulo 3 se presentan los materiales y métodos, donde se explica el procedimiento sobre el que se basa el diseño y la implementación de los SCLD que se presentan en esta tesis; los programas de simulación utilizados para su evaluación, el protocolo estándar benchmark de comparación de estrategias de control de SFA y la instrumentación necesaria para implementar los SCLD.

Los capítulos 4 y 5 exponen el trabajo realizado para diseñar, implementar y validar el SCLD_SS a la EDAR Granollers y el SCLD_N a la EDAR Taradell, respectivamente. Ambos capítulos presentan la misma estructura: presentación del capítulo, definición de los objetivos del sistema de control, descripción de la EDAR donde se implementa el SCLD, desarrollo de índices de evaluación para cuantificar el cumplimiento de los objetivos

previamente establecidos, explicación en detalle del proceso de diseño del SCLD y su evaluación mediante estudios de simulación, implementación del SCLD a la EDAR real y su validación, y finalmente discusión del trabajo realizado a lo largo del capítulo.

En el capítulo 6 se enumeran las principales conclusiones obtenidas de la realización de la presente tesis.

ABSTRACT

There are a great number of uncertainty factors that affect the Activated Sludge Systems (ASS) of Wastewater Treatment Plants (WWTP). The classical methods often have difficulties controlling the ASS (biological reactor and settler) because of the complexity of their processes. More and more, it's possible to implement control strategies based on fuzzy logic instead of conventional control systems. Fuzzy Logic Control Systems (FLCS's) combine the system expert rules with a flexible specification of their output parameters. These control systems make expert knowledge integration easy and at the same time avoid the abrupt changes of the controlled parameters.

This thesis presents two proposals of FLCS's, from their design to their implementation and validation in two real facilities: the Granollers WWTP and the Taradell WWTP. The first control system was developed to control the effluent suspended solids concentration (FLCS_SS) by modifying the recirculation of activated sludge. The second one was designed to control the biological nitrogen removal (FLCS_N) by manipulating the aeration.

The fundamental concepts to understand the FLCS's development are explained in the first chapter. The ASS and their biological and settling processes are introduced. A deeper explanation of the processes considered in this thesis (biological nitrogen removal and secondary settling) is given in this section. Fuzzy logic and FLCS concepts are also introduced. To conclude this chapter, a summary of published scientific papers from the last 15 years, related to fuzzy logic applications in the wastewater treatment area, is presented. In this review it is confirmed that a lot of simulation and pilot plant work exists, but there have been only a few implementation studies in real WWTPs.

Following a review of the use of fuzzy logic in biological wastewater treatment, the objectives of this thesis are established in Chapter 2.

The materials and methods are described in Chapter 3. First of all, the procedure, upon which the FLCS's design and implementation are based, is explained in depth; secondly, simulation programs used in the FLCS's evaluation are described; next, the benchmark control strategy comparison protocol is presented, and finally, the instrumentation used for the FLCS's implementation is enumerated.

In Chapters 4 and 5, the work to design, implement and validate the FLCS's in the Granollers WWTP and in the Taradell WWTP respectively, is presented. Both chapters have the same structure: a chapter presentation, a goal definition of FLCS, a description of the WWTP where the FLCS will be implemented, the evaluation index development to quantify the accomplishment of the predefined goals, a detailed explanation about designing the FLCS process and its evaluation by simulation studies, the implementation of FLCS to real WWTPs and their validation and, finally, a discussion of the work carried out in the entire chapter is presented.

The main conclusions obtained in this thesis are enumerated in Chapter 6.

ÍNDIX

ÍNDIX	i
ABREVIACIONS	v
I. INTRODUCCIÓ	1
I.1. AIGÜES RESIDUALS. TRACTAMENT I CONTROL.....	1
I.1.1. Les aigües residuals i el seu tractament	1
I.1.2. Sistema de fangs activats.....	3
I.1.2.1. Processos biològics	4
I.1.2.2. Procés de decantació secundària	9
I.1.3. Control de processos.....	16
I.1.3.1. Estructures de control	16
I.1.3.2. Acció de control	18
I.1.4. Control d'EDAR	19
I.1.5. Protocol Benchmark.....	22
I.2. LA Lògica difusa. SISTEMES DE CONTROL BASAT EN Lògica difusa.....	22
I.2.1. La lògica difusa	22
I.2.2. Aplicacions de la lògica difusa	23
I.2.3. Característiques dels sistemes difusos	25
I.2.4. Terminologia i fonaments de la lògica difusa	26
I.2.4.1. Funció de pertinença	26
I.2.4.2. Grau de pertinença	27
I.2.4.3. Suport.....	27
I.2.4.4. Etiqueta lingüística	28
I.2.4.5. Variable difusa	28
I.2.4.6. Univers de discurs.....	28
I.2.4.7. Formes de les funcions de pertinença	28
I.2.4.8. Operacions entre els conjunts difusos.....	32
I.2.4.9. Regles difuses. Des de la premissa fins a la conclusió	34
I.2.4.10. Defuzzificació.....	38
I.2.5. Sistema de control basat en lògica difusa	39
I.3. LA Lògica difusa EN EL MÓN DEL TRACTAMENT BIOLÒGIC D' AIGÜES RESIDUALS.	40
I.3.1. L'ús de la lògica difusa per controlar processos biològics.....	40
I.3.2. Antecedents: ús de la lògica difusa en el món del tractament d'aigües residuals.....	42
II. OBJECTIUS	51
III. MATERIALS I MÈTODES	55
III.1. METODOLOGIA DE DISSENY I IMPLEMENTACIÓ D'UN SISTEMA DE CONTROL BASAT EN Lògica difusa.....	55
III.2. PROGRAMES INFORMÀTICS PER ESTUDIS DE SIMULACIÓ.....	58

III.2.1.	GPS-X (General Purpose Simulator – X).....	58
III.2.2.	MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox).....	61
III.2.3.	Connexió MATLAB – GPS-X.....	62
III.3.	PROTOCOL BENCHMARK.....	63
III.3.1.	Configuració de la planta Benchmark.....	63
III.3.2.	Models del procés.....	64
III.3.2.1.	Model del procés biològic.....	64
III.3.2.2.	Model de decantació.....	68
III.3.3.	Composició de l'aigua d'entrada.....	72
III.3.4.	Simulacions.....	74
III.3.4.1.	Simulacions en Estat Estacionari.....	74
III.3.4.2.	Simulacions en dinàmic.....	74
III.3.5.	Índexs.....	74
III.3.5.1.	Índexs de procés.....	75
III.3.5.2.	Índexs de control.....	77
III.4.	INSTRUMENTACIÓ.....	79
IV.	SISTEMA DE CONTROL BASAT EN LòGICA DIFUSA PELS SòLIDS EN SUSPENSió DE L'EFLUENT DE L'EDAR GRANOLLERS.....	83
IV.1.	PRESENTACIó.....	83
IV.2.	OBJECTIUS.....	84
IV.3.	L'EDAR GRANOLLERS.....	85
IV.3.1.	Descripció de l'EDAR Granollers.....	85
IV.3.2.	Caracterització de l'aigua d'entrada de l'EDAR Granollers.....	87
IV.3.3.	Monitoratge de l'EDAR Granollers.....	89
IV.3.4.	Operació i control de l'EDAR Granollers.....	90
IV.3.5.	Rendiments d'eliminació de l'EDAR Granollers.....	90
IV.4.	ÍNDEXS D'AVAlUACIó.....	91
IV.4.1.	Índex d'avaluació de la Qualitat de l'Efluent segons els Sòlids en Suspensió, QE_{ss}	93
IV.4.2.	Índex comparatiu de la Diferència de la Qualitat de l'Efluent segons els Sòlids en Suspensió, DQE_{ss}	93
IV.4.3.	Índex d'avaluació del Temps de Violació del límit legal de Sòlids en Suspensió a l'Efluent, TV_{ss}	94
IV.4.4.	Índex comparatiu de la Diferència del Temps de Violació del límit legal dels Sòlids en Suspensió de l'Efluent, DTV_{ss}	94
IV.4.5.	Índex d'avaluació del Consum de l'Energia de Bombeig del cabal de recirculació, CEB_{rec}	95
IV.4.6.	Índex comparatiu de la Diferència de Consum de l'Energia de Bombeig del cabal de recirculació, $DCEB_{rec}$	95
IV.4.7.	Índex d'avaluació de l'Estabilitat del Decantador, $CumED$	96
IV.4.8.	Índex comparatiu de la Diferència de l'Estabilitat del Decantador, $DCumED$	98
IV.5.	DISSENY DEL SCLD_SS.....	98
IV.5.1.	Identificació i selecció dels components del SCLD_SS.....	99

IV.5.2.	Descripció dels components i operadors del SCLD_SS	101
IV.5.2.1.	Definició de les variables difuses del SCLD_SS.....	102
IV.5.2.2.	Desenvolupament de les regles ‘Si – Llavors’	107
IV.5.2.3.	Exemple de funcionament del SCLD_SS.....	119
IV.5.3.	Avaluació del SCLD_SS	120
IV.5.3.1.	Estudi de simulació amb el model de la planta Benchmark.....	121
IV.5.3.2.	Estudi de simulació amb el model de l’EDAR Granollers	130
IV.6.	IMPLEMENTACIÓ DEL SCLD_SS A L’EDAR GRANOLLERS	139
IV.6.1.	Restriccions de l’EDAR Granollers.....	140
IV.6.2.	Definició del SCLD_SS per l’EDAR Granollers.....	140
IV.6.2.1.	Integració del SCLD_SS en els llaços de control automàtic de l’EDAR Granollers	143
IV.6.3.	Desenvolupament de l’aplicació informàtica pel SCLD_SS.	143
IV.6.4.	Validació del SCLD_SS a l’EDAR Granollers.....	147
IV.7.	DISCUSSIÓ SOBRE EL PROCÉS DE DISSENY, IMPLEMENTACIÓ I VALIDACIÓ DEL SCLD_SS.....	149
V.	SISTEMA DE CONTROL BASAT EN LÒGICA DIFUSA PER L’ELIMINACIÓ BIOLÒGICA DEL NITROGEN DE L’EDAR TARADELL.....	155
V.1.	PRESENTACIÓ	155
V.2.	OBJECTIUS.....	156
V.3.	L’EDAR TARADELL.....	157
V.3.1.	Descripció de l’EDAR Taradell	157
V.3.2.	Caracterització de l’aigua d’entrada de l’EDAR Taradell.....	159
V.3.3.	Monitoratge de l’EDAR Taradell	161
V.3.4.	Operació de l’EDAR Taradell.....	162
V.3.5.	Rendiments d’eliminació de l’EDAR Taradell.	163
V.4.	ÍNDEXS D’AVALUACIÓ	164
V.4.1.	Índex d’avaluació de la Qualitat de l’Efluent, QE.	165
V.4.2.	Índex d’avaluació de la Qualitat de l’Efluent segons el Nitrogen, QEN.....	165
V.4.3.	Índex d’Avaluació del Temps de Violació del límit legal de Nitrogen a l’efluent, TVN.	166
V.4.4.	Índex d’avaluació del Consum Energètic de l’Aeració, CEA.....	166
V.4.5.	Índex d’avaluació del Consum Energètic de l’Aeració segons el cabal d’entrada, CEAQ.....	167
V.4.6.	Índex d’avaluació del Consum Energètic de l’Aeració segons la càrrega d’entrada, CEAQ2.....	168
V.5.	DISSENY DEL SCLD_N.....	168
V.5.1.	Identificació i selecció dels components del SCLD_N	169
V.5.2.	Descripció dels components i operadors del SCLD_N	171
V.5.2.1.	Definició de les variables difuses de SCLD_N.....	172
V.5.2.2.	Desenvolupament de les regles ‘Si-Llavors’	178
V.5.3.	Avaluació del SCLD_N	181
V.5.3.1.	Modelització de l’EDAR Taradell.....	181
V.5.3.2.	Procediment de l’estudi de simulació amb el model de l’EDAR Taradell.....	186
V.5.3.3.	Resultats de l’avaluació del SCLD_N	189

V.6.	IMPLEMENTACIÓ DEL SCLD_N A L'EDAR TARADELL.....	194
V.6.1.	Restriccions de l'EDAR Taradell.....	194
V.6.2.	Desenvolupament de l'aplicació informàtica pel SCLD_N.....	194
V.6.3.	Validació del SCLD_N a l'EDAR Taradell.....	196
V.7.	DISCUSSIÓ SOBRE EL PROCÉS DE DISSENY, IMPLEMENTACIÓ I VALIDACIÓ DEL SCLD_N.	201
VI.	CONCLUSIONS	207
VII.	BIBLIOGRAFIA.....	215
ANNEX 1.	Fitxers d'enllaç entre MATLAB i GPS-X.....	227
ANNEX 2.	Codis dels programes informàtics per la implementació dels SCLD.....	231
ANNEX 3.	Representacions gràfiques del seguiment realitzat a l'EDAR Taradell.....	245

ABREVIACIONS

A	Alt	MIN	Mínim
Aer	Aeració	MNeg	Molt Negatiu
AF	Alçada de Fangs	MO	Matèria Orgànica
AGV	Àcids Grassos Volàtils	Nor	Normal
ASM1	Model de Fangs Activats número 1	N	Nitrogen
ASM2	Model de Fangs Activats número 2	N/D	Nitrificació / Desnitrificació
ASM2d	Model de Fangs Activats número 2 modificat	NDS	N/D simultània
ASM3	Model de Fangs Activats número 3	N _e	Nitrogen a l'efluent
ADP/ATP	Difosfat/Trifosfat d'adenosina	NH ₄ ⁺	Amoni
B	Baix	NKT	Nitrogen Kjeldhal Total
Bio.Fix.	Biomassa Fixada	NO	Negació NO (complement)
C	Carboni	NO ₂ ⁻ / NO ₃ ⁻	Nitrits / Nitrats
CEA	Consum Energètic per Aeració	NO _x ⁻	Nitrits més nitrats
CEA _{O2}	CEA segons la càrrega d'entrada	N_pH	Neutralització del pH
CEA _Q	CEA segons el cabal d'entrada	Ntotal	Nitrogen Total
CEB _{rec}	Consum Energètic per Bombeig recirculació	O	Disjunció O (unió)
CLD	Control / Controlador basat en Lògica Difusa	OAF	Organismes Acumuladors de fòsfor
CT	Constant	OD	Oxigen Dissolt
CumED	Cumulatiu de l'Estabilitat del Decantador	ON-OFF	Engageda-Aturada
DBO ₅	Demanda Biològica d'Oxigen en 5 dies	ORP	Potencial d'Òxido-Reducció
DCEB _{rec}	Diferència de CEB _{rec}	Orto-P	Ortofòsfats
DCumED	Diferència deCumED	P	Fòsfor
DQE _{SS}	Diferència de QE _{SS}	PC	Punt de Consigna
DQO	Demanda Química d'Oxigen	PHB	Polihidroxibutirat
DS	Decantador Secundari	PID	Proporcional, Integral, Derivatiu
DTV _{SS}	Diferència TV _{SS}	Poli-P	Polifòsfats
DV30	V30 diluïda	Pos	Positiu
EBN	Eliminació Biològica de Nutrients	PROD	Producte
EBNi	Eliminació Biològica de Nitrogen	Ptotal	Fòsfor total
EBMO	Eliminació Biològica de Matèria Orgànica	Qen	Cabal d'entrada
EBP	Eliminació Biològica de Fòsfor	Qrec	Cabal de recirculació
EDAR	Estació Depuradora d'Aigües Residuals	QrecCT	Cabal de recirculació constant
EE	Estat Estacionari	QE	Qualitat de l'Efluent
EQ	Effluent Quality	QE _{SS}	Qualitat de l'Efluent segons SS
F.Act.	Fangs Activats	QEN	Qualitat de l'Efluent segons N
FAer	Factor Aeració	SCADA	Supervisory Control & Data Acquisition
FLT	Fuzzy Logic Toolbox	SCLD	Sistema de Control basat en LD
FIS	Fuzzy Inference System	SCLD_SS	SCLD dels Sòlids en Suspensió
F:M	Food-Microorganism relation	SCLD_N	SCLD del Nitrogen
F-Q	Físico Químic	SFA	Sistema de Fangs Activats
GPS-X	General Purpose Simulator-X	SS	Sòlids en Suspensió
h.-eq.	habitants equivalents	SS _e	Sòlids en Suspensió a l'efluent
I	Conjunció I (intersecció)	SSLM	Sòlids en Suspensió del Licor Mescla
IAE	Integrated Absolute Error	SSVLM	SS Volàtils del Licor Mescla
IIR	Impulse Infinite Response	SUM	Suma
ISE	Integrated Squared Error	TD	Tanc de Desaeració
IVEA _{3.5}	Índex Volumètric Específic Agitat a 3.5 g·l ⁻¹	TV _N	Temps de Violació del Nitrogen
IVF	Índex Volumètric de Fangs	TV _{SS}	Temps de Violació dels SS
IVFD	IVF diluït	V30	Test V30
IWA	International Water Association	VSZ	Velocitat de Sedimentació Zonal
LD	Lògica Difusa	WEF	Water Environment Federation
MA	Molt Alt		
MAX	Màxim		
MB	Molt Baix		

INTRODUCCIÓ



I. INTRODUCCIÓ

I.1. AIGÜES RESIDUALS. TRACTAMENT I CONTROL.

I.1.1. Les aigües residuals i el seu tractament

L'aigua és un recurs insubstituïble per a la vida. Durant segles l'home ha estat utilitzant aquest recurs sense limitacions. No obstant, amb l'era de la industrialització i el creixement demogràfic, els usos de l'aigua han incrementat vertiginosament incidint negativament en la seva qualitat i quantitat. La demanda cada vegada major d'un recurs que està esdevenint escàs, genera una elevada quantitat d'aigües residuals que desestabilitzen el cicle de l'aigua: deteriorament dels aqüífers, rius, aigües litorals i similars.

Les aigües residuals contenen diferents contaminants, procedents de la indústria, de la concentració de la població i d'activitats agropecuàries. En l'època prèvia al desenvolupament industrial, la natura tenia la capacitat d'autodepurar les aigües residuals, però actualment, aquest equilibri s'ha trencat. La concentració demogràfica i la contaminació d'origen industrial han comportat que s'hagin de buscar mecanismes artificials per ajudar a accelerar els processos d'autoneteja dels ecosistemes. És en aquest marc que neix el concepte antropogènic del tractament d'aigües residuals.

En les darreres dècades, el tractament de les aigües residuals així com la figura de l'Estació Depuradora d'Aigües Residuals (EDAR) ha anat prenent rellevància i actualment és un factor clau a l'hora de parlar de la qualitat de les aigües. No obstant això, no es pot parlar només de la construcció d'EDAR i la seva correcta i eficient gestió, sinó que també cal aconseguir un sistema que no només es limiti a les mesures correctores (tractament de les aigües residuals) sinó que englobi també una política de prevenció, consum i usos de l'aigua.

Cal recordar que una EDAR, des d'un punt de vista genèric, és una instal·lació industrial, que tant en la seva fase de construcció com d'explotació implica un impacte ambiental. Per tant, en aquest marc sembla interessant tenir en compte no només l'impacte ambiental positiu sinó també el negatiu, per tal de prendre les decisions d'una forma més ajustada als objectius de millora del medi ambient i del desenvolupament sostenible que es pretenen (Poch, 1999).

Amb el tractament de les aigües residuals s'espera evitar i reduir la degradació ambiental i el perjudici de la salut. Les aigües residuals municipals transporten una varietat de residus que consisteixen normalment en un 99,9% d'aigua (on es troben els contaminants solubles) i un 0.1% de sòlids.

L'objectiu bàsic de l'operació d'una EDAR és minimitzar l'impacte dels contaminants al medi receptor. Encara que la qualitat de l'efluent té unes limitacions específiques d'abocament, el cabal i les característiques físiques, químiques i biològiques de l'afluent de l'EDAR canvien contínuament. Alguns d'aquests canvis són a curt termini, produïts per fluctuacions diàries, setmanals, mensuals o estacionals de la quantitat i composició de l'aigua residual que arriba a l'EDAR.

Altres canvis són a llarg termini, deguts a les alteracions de la població d'una àrea, característiques socials, econòmiques i la producció industrial o tecnològica. Per tant, la qualitat de les aigües dependrà, en últim terme, de la capacitat del gestor de la instal·lació en reconèixer i respondre de manera efectiva als problemes potencials que poden aparèixer a l'EDAR. Aquesta responsabilitat demana un ampli coneixement de les instal·lacions i tecnologia del procés de tractament de les aigües residuals (WEF, 1998)

Els diferents tractaments aplicables en els processos de depuració d'aigües residuals urbanes es classifiquen de manera general en pretractament, tractament primari, secundari i terciari. En la realitat una EDAR no presenta un sol tractament sinó la combinació de varis:

- El pretractament de l'aigua residual es troba a l'inici de qualsevol EDAR amb l'objectiu d'eliminar materials que podrien malmetre la maquinària de la planta i/o desestabilitzar el procés. Les substàncies que normalment s'eliminen en aquest tractament són restes vegetals, plàstics, pedres, greixos, escumes, tòxics i similars. L'equipament i mètodes utilitzats consisteixen en l'addició química, preaeració, reixes de gruixuts i de fins, tancs de desaeració, pous de gruixuts i similars.
- A continuació del pretractament, el tractament primari s'encarrega d'eliminar gran part de les partícules en suspensió i flotants. Normalment consisteix en un sistema físic de separació basat en el fenomen de la sedimentació – clarificació. Si està ben dissenyat, es pot arribar a eliminar d'un 60 a un 75% dels Sòlids en Suspensió (SS) de l'aigua d'entrada i fins a un 35% de la Demanda Biològica d'Oxigen (DBO₅). No obstant, els sòlids col·loïdes, els sòlids dissolts i la DBO₅ soluble no poden ser eliminats, de manera que és necessària la figura d'un tractament suplementari, el tractament secundari (WEF, 1998).
- El tractament secundari tracta la matèria orgànica biodegradable no eliminada anteriorment. La majoria de tractaments secundaris són processos biològics, classificats de manera general en microorganismes suspesos al medi (fangs o llots activats) i microorganismes immobilitzats (sistemes de biomassa fixada com filtres percoladors, biodiscs...). El procés (ja sigui de fangs activats o biomassa fixada) es basa en mantenir una població mixta de microorganismes que, en presència d'oxigen, consumeixen la matèria orgànica biodegradable dissolta a l'aigua, amb l'objectiu de mantenir el seu cicle vital i produir nous microorganismes. La població de microorganismes no només ha d'assimilar la càrrega orgànica rebuda sinó que també ha de ser capaç de formar flocs per tal de poder ser fàcilment separats de l'aigua depurada en un posterior sedimentador o decantador.
- En l'aigua residual també existeixen nutrients (nitrogen i fòsfor) que amb els tractaments anteriorment descrits no poden ser reduïts en gran mesura. Per això existeixen els anomenats tractaments terciaris o avançats, que permeten reduir el contingut d'aquests nutrients així com el contingut de la Matèria Orgànica (MO). Els tractaments terciaris també es refereixen als processos de desinfecció per eliminar microorganismes patògens de l'aigua, o altres tractaments posteriors per afavorir la reutilització de l'aigua depurada per a

usos secundaris (agrícoles, de procés...). Amb l'aparició de la directiva 91/271/CE (Diari oficial nºL135 de 30/5/1991 p. 004-0052) que regula l'abocament no només dels SS i MO sinó també de nutrients, moltes EDAR s'han adaptat incloent aquest tractament terciari de manera biològica (amb l'ampliació de reactors amb diferents zones per eliminar biològicament el nitrogen i/o fòsfor) o físico-química (per exemple l'eliminació del fòsfor per addició de clorur fèrric). Els límits d'abocament de SS, MO (indicada pels paràmetres de Demanda Química d'Oxigen (DQO) i DBO₅) i nutrients (Fòsfor total i Nitrogen total), es presenten en la taula 1.1.

Taula 1.1. Límits d'abocament d'una EDAR establerts per la Directiva 91/271/CE.

Paràmetre	Concentració	Percentatge de reducció
DBO ₅ (g O ₂ · m ⁻³)	25	70 - 90 %
DQO (g O ₂ · m ⁻³)	125	75 %
SS (g · m ⁻³)	35	90 %
Fòsfor total (g P · m ⁻³)**	2 1 (> 100,000 h.-e*.)	80 %
Nitrogen total (g N · m ³)**	15 10 (> 100,000 h.-e*.)	70 - 80 %

* h.-e. = habitant equivalent. D'acord amb la Directiva 91/271/CE, un h.-e. es defineix com 60 gr. de DBO₅ al dia, quantitat de contaminació diària que es considera per habitant.

** La limitació pel que fa als nutrients tan sols afecta a aquelles EDAR que aboquen en zones sensibles. Les altres instal·lacions poden sobrepassar les concentracions límit d'abocament. A Catalunya gran part de les conques al·luvials són considerades zones sensibles.

I.1.2. Sistema de fangs activats.

El sistema més habitual de tractament biològic de les aigües residuals és l'anomenat Sistema de Fangs Activats (SFA). Els fangs activats estan formats per una barreja de poblacions de microorganismes (anomenades també biomassa) que actuen conjuntament i de manera eficient sempre i quan es trobin en condicions adequades per fer-ho (temperatura, presència o absència d'Oxigen Dissolt (OD), disponibilitat de l'aliment, pH, ...). El SFA convencional consisteix en l'oxidació bacteriana dels residus orgànics de l'aigua, seguida d'una separació entre els microorganismes i l'aigua tractada (figura 1.1).

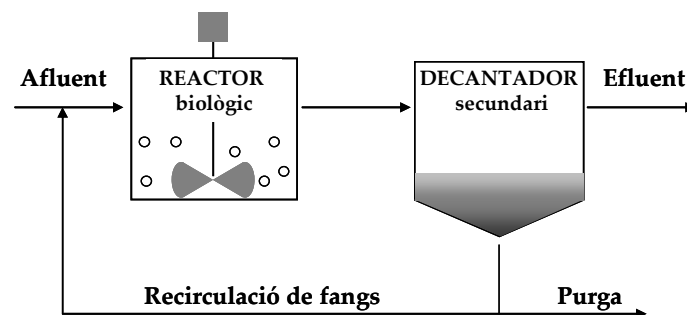


Figura 1.1. Esquema del sistema de fangs activats.

Simplificant-ho, per a un procés aerobi, es pot considerar que els microorganismes utilitzen l'oxigen present a l'aigua per tal de consumir el substrat o aliment, en aquest cas les molècules orgàniques biodegradables contingudes en l'aigua residual, i que com a resultat d'aquest consum, els microorganismes obtenen l'energia necessària per tal de mantenir les seves funcions vitals, alhora que generen nous individus (WEF, 1996). A continuació, els microorganismes es separen de l'aigua tractada per un procés de decantació. Amb l'objectiu de mantenir un sistema estable, una part de la biomassa és retornada al reactor mitjançant la recirculació, mentre que la part restant (el fang en excés) és eliminada del sistema a través de la purga.

En funció de la configuració que presenta, una EDAR amb un SFA pot arribar a aconseguir l'eliminació simultània del carboni i dels nutrients (nitrogen i fòsfor).

I.1.2.1. Processos biològics

Un SFA presenta un ampli ventall d'esquemes de tractament amb la finalitat d'eliminar biològicament i de manera simultània, el carboni i els nutrients: el nitrogen i el fòsfor. A continuació es descriuen els principals processos biològics implicats en l'eliminació del carboni i del nitrogen i els esquemes de tractament més utilitzats. L'eliminació biològica del fòsfor és explicada breument, ja que no és objecte d'aquesta tesi. A C.W. Randall *et al.* (1992), Henze *et al.* (1995), Jeppsson (1996a), STOWA (2002) i Metcalf & Eddy (2003), es pot trobar informació més detallada sobre l'eliminació biològica del fòsfor.

Eliminació Biològica del Carboni

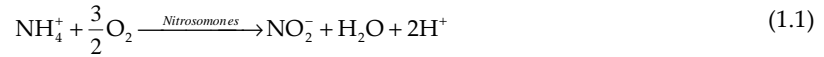
L'eliminació biològica del carboni orgànic soluble succeeix primàriament pel creixement anòxic i aeròbic d'organismes heterotròfics. El carboni orgànic soluble passa a formar part de la biomassa o es converteix en diòxid de carboni en forma soluble i gas. El creixement aeròbic es produeix quan hi ha disponibilitat d'oxigen mentre que en el creixement anòxic no hi ha presència d'oxigen dissolt però hi ha nitrats que poden ser utilitzats pels organismes com a font d'oxigen.

Eliminació Biològica del Nitrogen

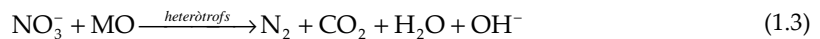
La major part del nitrogen de l'aigua residual que arriba a una EDAR es troba en forma de nitrogen orgànic i amoniacal, encara que la forma més predominant és el nitrogen amoniacal (70-85%) ja que el nitrogen orgànic s'hidrolitza i amonifica ràpidament. L'Eliminació Biològica del Nitrogen (EBNi) es produeix en dues fases, la nitrificació i la desnitrificació.

El procés de nitrificació consisteix en la transformació del nitrogen amoniacal en nitrats a través del creixement aeròbic d'un grup específic de microorganismes autòtrofs. Aquesta transformació es duta a terme en dues etapes. En la primera es produeix l'oxidació de l'amoni a nitrit gràcies a l'activitat de bacteris amoni oxidants. En la segona etapa, el nitrit és transformat a nitrat mitjançant els bacteris nitrit oxidants.

Les espècies més conegudes responsables de l'oxidació biològica del nitrogen són els bacteris amoni oxidants, com els *Nitrosomonas*, i els nitrit oxidants, com els *Nitrobacter*. Les dues reaccions que es produeixen en aquest procés de nitrificació són presentades en les equacions 1.1 i 1.2.



La desnitrificació succeeix pel creixement anòxic d'heteròtrofs facultatius que redueixen els nitrits/nitrats a nitrogen gas mitjançant el consum de carboni. El nitrat substitueix l'oxigen en els processos de respiració dels heteròtrofs capaços de desnitrificar en condicions anòxiques, en absència d'oxigen molecular (EPA, 1992). La reacció que es produeix en la desnitrificació pot ser representada tal i com es mostra en l'equació 1.3.



La figura 1.2 presenta de manera esquemàtica les transformacions del nitrogen en els processos de tractament biològic de les aigües residuals.

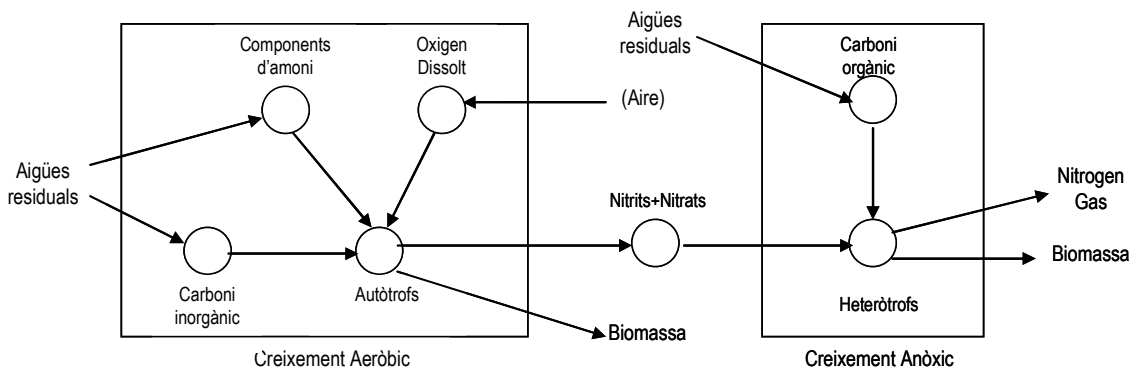


Figura 1.2. Principals reaccions en l'EBNi (Olsson i Newell, 1999).

Configuracions per l'Eliminació Biològica del Nitrogen

El primer procés que es produeix en l'EBNi és la hidròlisi del nitrogen orgànic. A la pràctica, com que les velocitats d'hydròlisi són significativament més elevades que les del procés de nitrificació, no es sol considerar aquest procés d'hydròlisi del nitrogen a l'hora d'explicar les diferents configuracions per a l'EBNi. Per tant, segons la teoria explicada en l'apartat anterior, la seqüència lògica a seguir seria la d'un primer reactor aeròbic per la nitrificació i un segon anòxic per la desnitrificació. No obstant, la configuració d'aquest sistema aeròbic-anòxic comporta no disposar de prou carboni orgànic per a la desnitrificació, ja que en condicions aeròbies (el primer reactor és aeròbic) s'elimina gran part del carboni orgànic. Aquest problema es pot solucionar afegint la quantitat de carboni orgànic necessària amb una font externa com el metanol o l'àcid acètic, o bé, amb altres configuracions per l'EBNi (figura 1.3).

La Nitrificació /Desnitrificació (N/D) es pot portar a terme en sistemes de 1 o més etapes, (s'entén com etapa, un SFA amb reactor aeròbic, anòxic o combinació dels dos, més la decantació secundària). La figura 1.3 presenta les configuracions de tractament més utilitzades, totes elles d'una etapa. Els sistemes de dues etapes es basen en tenir els processos de N/D separats, és a dir, cadascun d'ells amb el seu propi decantador secundari i la seva recirculació independent. Els sistemes de tres etapes consisteixen en la separació completa de les poblacions bacterianes responsables de l'oxidació del carboni i de la N/D, de manera que s'estableixen dues etapes airejades, la primera per eliminar la MO i la segona per la nitrificació, prèvies a una tercera etapa anòxica per la desnitrificació (amb addició de font de carboni externa).

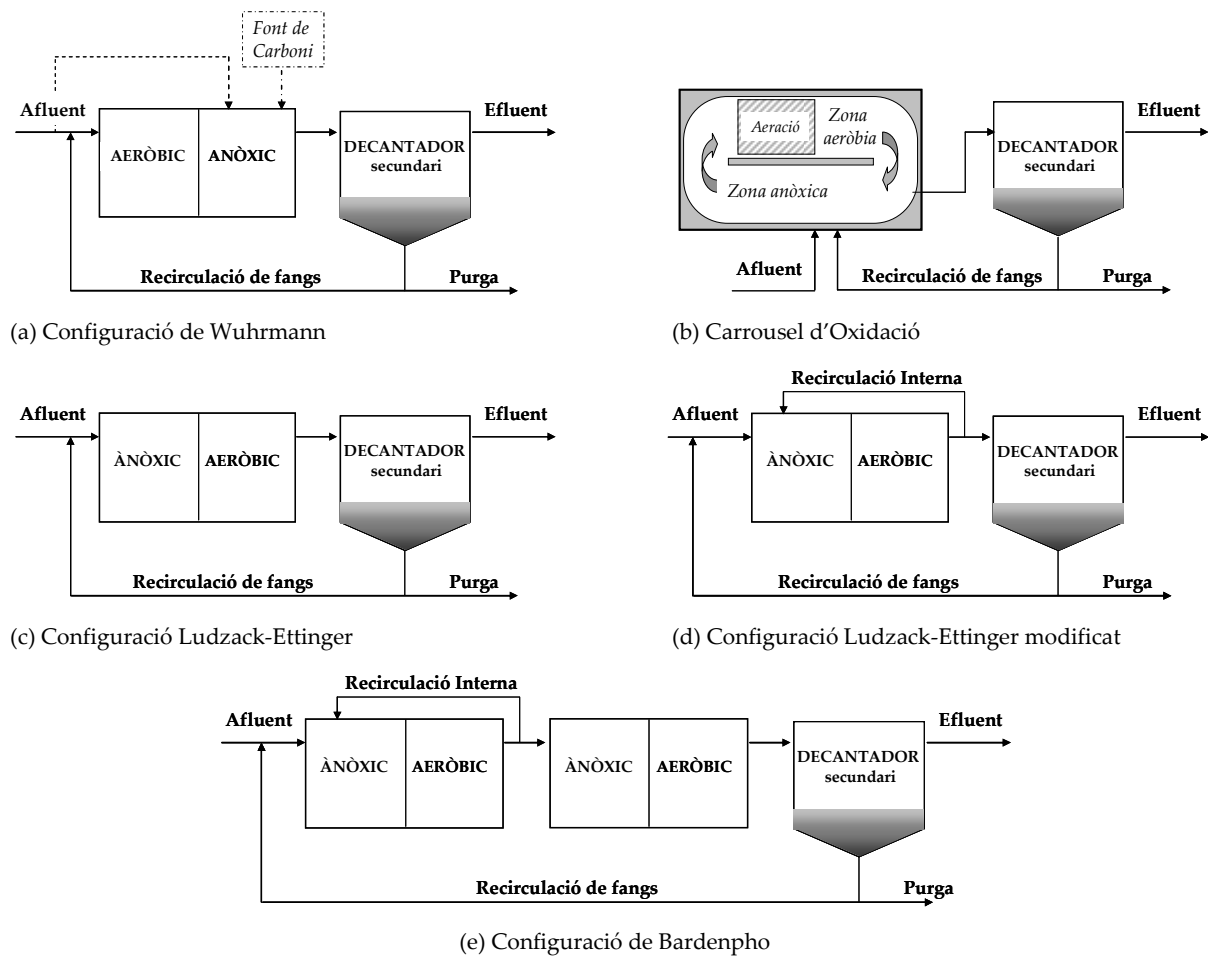


Figura 1.3. Principals configuracions d'un SFA per l'EBNi.

La configuració de Wuhrmann (figura 1.3 (a)) consisteix en una sola etapa amb una zona aeròbica seguida d'una zona anòxica, de manera que primer es produeix la nitrificació i a continuació la desnitrificació. No obstant, és necessari desviar una part del cabal d'entrada al reactor aeròbic i/o fer una addició externa d'una font de carboni orgànic per tal que pugui produir-se la desnitrificació al reactor anòxic.

L'esquema de Ludzack-Ettinger (figura 1.3 (c)) inverteix l'ordre dels reactors per tal d'evitar l'addició externa de carboni, primer la zona anòxica i després l'aeròbica. Ara bé, com que la zona anòxica es troba al principi, és

necessari recircular els nitrats produïts en la zona aeròbica per tal de que puguin ser desnitrificats. Aquesta recirculació del reactor aeròbic a l'anòxic és anomenada recirculació interna i va donar lloc al procés anomenat Ludzack-Ettinger modificat (figura 1.3 (d)).

El procés Bardenpho (figura 1.3 (e)) consta de 4 reactors biològics en una sola etapa. Els dos primers reactors (anòxic-aeròbic + recirculació interna) equivaldrien a l'esquema de Ludzack-Ettinger modificat. Amb l'objectiu d'aconseguir una eliminació completa dels nitrats, el tercer reactor (anòxic) elimina el nitrat que no ha estat recirculat del segon reactor utilitzant el carboni orgànic provinent del creixement endogen de la biomassa com a font de carboni. Finalment, el quart reactor airejat permet eliminar les restes de MO així com afavorir part dels processos d'acumulació de fòsfor que es produeixen en condicions aeròbiques.

També es pot aconseguir un bon rendiment d'EBNi amb carrousel d'oxidació suficientment grans per poder mantenir en el mateix reactor zones anòxiques i aeròbiques (figura 1.3 (b)). Existeixen diferents configuracions de carrousel que permeten treballar en condicions aeròbiques i anòxiques en funció de les necessitats, són els carrousel en fases alternes, on l'alimentació es canvia de carrousel cada cert període de temps. El disseny més comú és l'anomenat Biodenitro, que opera amb quatre fases alternes on es varia l'alimentació del carrousel així com també, les condicions anòxiques o aeròbiques en cadascun d'ells.

Nitrificació i Desnitrificació Simultània

La Nitrificació i Desnitrificació Simultània (NDS) es produeix quan els dos processos biològics succeeixen al mateix temps en el mateix reactor. Aquest fenomen també se l'anomena desnitrificació aeròbica (Holman i Wareham, 2005). Per a que es produeixi la NDS cal que es donin dues circumstàncies: una edat cel·lular significativament més elevada que la necessària per aconseguir la nitrificació i regions de baixa concentració d'OD que permetin que succeeixi la desnitrificació. Si l'edat del fang és suficientment alta, poden existir regions amb concentracions baixes d'OD en un tanc airejat sense impactar negativament al procés de nitrificació. Aquestes concentracions baixes d'OD poden produir-se en regions específiques com a resultat de la configuració del reactor i airejador (fenomen físic), o poden succeir dins del flocul de partícules del fang activat (fenomen microbiològic). El requeriment per transportar oxigen dins del flocul per difusió és resultat d'un gradient de concentració d'OD amb el flocul. Aquest gradient pot produir zones dins del flocul que afavoreixen la desnitrificació (Grady *et al.*, 1999).

En Randall *et al.*, 1992 i Van Huyssteen *et al.*, 1990, es presenten aplicacions on s'ha aconseguit la desnitrificació d'aproximadament un 50% del nitrat produït en un procés de NDS. Fins i tot, s'ha observat el procés de desnitrificació completa (entre un 70-90%) en sistemes de fangs activats amb carrousel d'oxidació. S'han aconseguit nivells elevats en la nitrificació i desnitrificació per sistemes amb carrousel d'oxidació operats amb concentracions baixes d'OD (entre 0.1 i 0.4 g·m⁻³) i amb temps de retenció hidràulic i cel·lular elevats (Rittman i Langeland, 1985; Trivedi i Heinen, 2000). En els últims anys, s'ha confirmat la NDS en una gran varietat de processos (Münch *et al.*, 1996; Sen i Dentel, 1998; Menoud *et al.*, 1999; Fuerhacker *et al.*; Puznava, *et al.* 2000;

Watanabe *et al.*, 2002; Hibiya *et al.*, 2003; Holman i Wareham, 2005). No obstant, actualment encara no hi ha acord sobre quin mecanisme preval en la NDS, el fenomen físic (distribució d'OD pel reactor) o microbiològic (gradient d'OD en el flocul del fang activat).

Eliminació Biològica del Fòsfor

El procés d'Eliminació Biològica del Fòsfor (EBP) és dut a terme per un tipus de microorganismes que tenen la capacitat d'emmagatzemar grans quantitats d'ortofosfat (orto-P) soluble en les seves cèl·lules en forma de polifosfat (poli-P) insoluble. Aquests bacteris reben el nom d'Organismes Acumuladors de Fòsfor (OAF).

L'EBP requereix seqüencialment condicions anaeròbiques (sense presència de nitrats ni oxigen dissolt) i aeròbiques. Sota condicions anaeròbiques, els OAF consumeixen substrat en forma d'acetat o altres àcids grassos volàtils (AGV) i el converteixen en un producte de reserva en forma de polihidroxibutirat (PHB). L'energia necessària pel consum del substrat i la conversió prové del trencament del poli-P que tenen emmagatzemat els OAF. Aquest trencament comporta un alliberament de fòsfor en la fase d'aigua en forma d'orto-P (figura 1.4). En condicions aeròbiques, els OAF oxiden el PHB acumulat. L'energia obtinguda d'aquest procés és emmagatzemada en forma d'ATP, el qual incorpora fòsfor extracel·lular (orto-P) per la seva formació. La relació ATP/ADP creix i té lloc la formació de poli-P intracel·lular (figura 1.4). Durant aquesta etapa aeròbica, els OAF incorporen més fòsfor del que alliberen en l'etapa anaeròbica. Com a conseqüència, hi ha una eliminació de fòsfor de les aigües residuals ja que aquest s'acumula en la biomassa. És per això que l'eficiència de l'EBP ha d'estar basada en el fòsfor total que entra a la l'EDAR amb l'aigua residual i el fòsfor total que s'aboca amb l'efluent (Grady *et al.*, 1999).

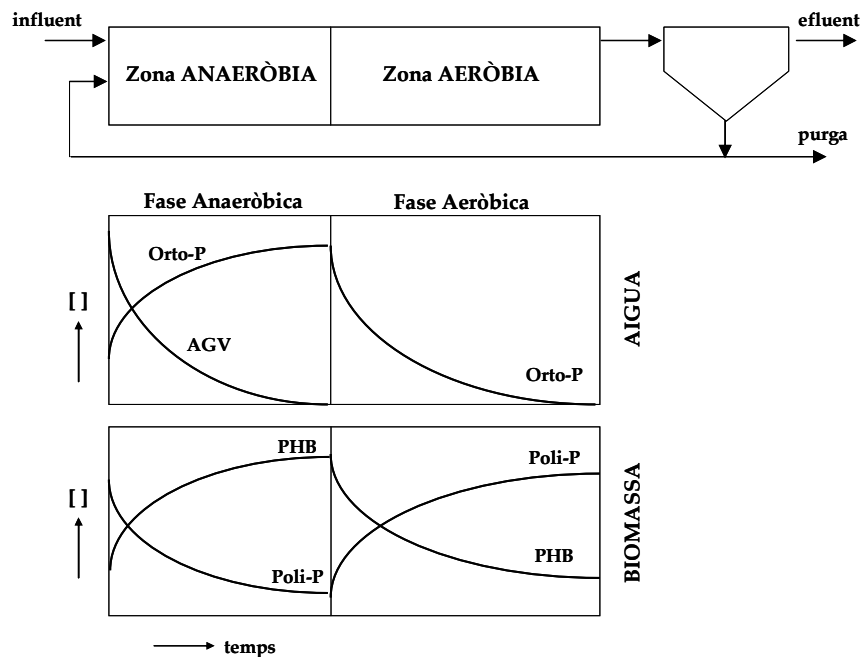


Figura 1.4. El principi bàsic que hi ha darrera de l'EBP (STOWA, 2002).

I.1.2.2. Procés de decantació secundària.

Un SFA no està format només pel reactor biològic, sinó que també contempla el decantador secundari, una unitat clau per tal d'aconseguir que els processos d'eliminació biològica donin bons resultats. Si el rendiment d'eliminació de MO dels microorganismes és bo, però el decantador no funciona adequadament, el resultat final del procés no serà el que s'espera. Un mal funcionament del decantador proporciona una baixa qualitat de l'aigua de sortida: augmenta la concentració de SS de l'efluent a la vegada que es produeix un augment de MO per l'escapament de la biomassa.

No obstant, la importància dels decantadors secundaris com a clarificadors no sols es fonamenta en l'obtenció d'un efluent de qualitat, sinó també en la pròpia estabilitat del sistema. Una pèrdua no controlada de sòlids per l'efluent del decantador provocaria una baixada de sòlids en el reactor, afectant al temps de retenció cel·lular i per tant, a la capacitat de depuració del sistema (Ribes, 2004). Per tot això, és imprescindible que un decantador secundari funcioni correctament si es vol aconseguir un rendiment satisfactori del SFA.

Ekama *et al.*, (1997) classifica els processos de sedimentació de partícules suspeses en el medi en quatre règims de sedimentació en funció de la concentració en suspensió i la tendència a flocular de les seves partícules (figura 1.5):

1. Sedimentació discreta no floculada o del tipus I.
2. Sedimentació discreta floculada o del tipus II.
3. Sedimentació zonal o del tipus III.
4. Compressió o sedimentació del tipus IV.

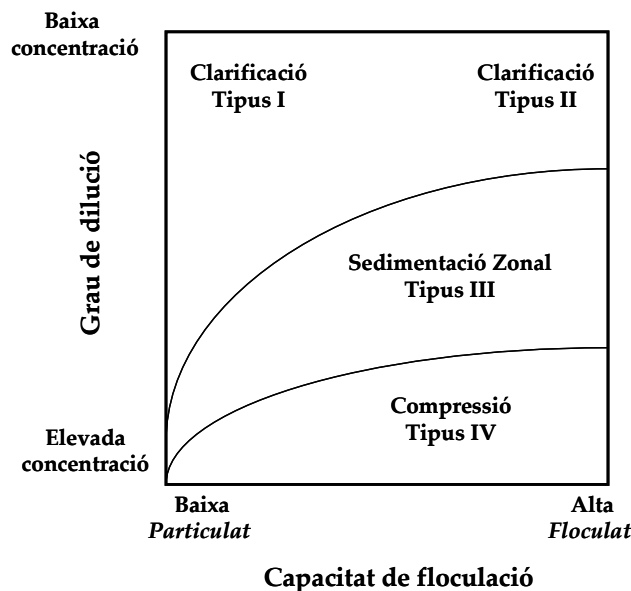


Figura 1.5. Diagrama del comportament de sedimentació de les partícules en funció de la seva concentració i capacitat de floculació (Ekama *et al.*, 1997)

El diagrama de la figura 1.5 resumeix els quatre règims de sedimentació. L'eix vertical representa les concentracions decreixents (increment de la dilució) i l'horitzontal, la tendència creixent a flocular. Les partícules

representades en el racó de dalt esquerre, totalment disperses i sense tendència a flocular, sedimenten segons el règim de sedimentació discreta, és a dir, cadascuna d'elles sedimenta individualment segons les seves pròpies característiques físiques. Les partícules representades al racó de dalt dret, estan disperses però tenen una forta tendència a flocular, de manera que, sedimenten més de manera floculada que no pas individualment. Aquests dos tipus de sedimentació són coneguts com a clarificació, on les partícules sedimenten individualment o formant flòculs individuals. Una característica fonamental d'aquests tipus de sedimentació és que les partícules més grans o denses sedimenten a més velocitat que les més petites o lleugeres, de manera que la suspensió es va clarificant a mesura que les partícules van sedimentant (Ekama *et al.*, 1997).

A mesura que la concentració augmenta i les partícules mostren una tendència més gran a flocular, el règim de sedimentació passa a ser del tipus III. Les forces d'interacció entre flòculs, són suficientment fortes com per provocar el descens de totes les partícules a la mateixa velocitat guardant les posicions relatives entre elles, independentment de la seva mida i densitat. És per això que a la sedimentació del tipus III se l'anomena sedimentació zonal. Com a resultat d'aquest procés, s'obté una interfase clarament diferenciada entre les partícules que sedimenten i el líquid sobrenedant (Ekama *et al.*, 1997).

A major concentració de partícules, aquestes s'aproximen cada vegada més, fins que entren en contacte directe les unes amb les altres. En aquest punt, el règim de sedimentació es considera del tipus IV o de compressió, representat a la part inferior de la figura 1.5. En aquestes condicions, el contacte mecànic entre les partícules provoca una tensió de compressió que fa pujar l'aigua cap a dalt i compacta els sòlids aconseguint un major espessiment del fang.

Aquests quatre règims de sedimentació es produeixen en el decantador secundari: el de tipus I en la zona més superior, el de tipus II en la zona superior de la regió mitjana, el de tipus 3 en la zona baixa de la regió mitjana i el de tipus IV en la regió inferior. Si relacionem aquesta classificació amb la figura 1.6, els dos primers règims de sedimentació correspondrien a la zona de clarificació, el de tipus III a la zona de sedimentació i el de tipus IV a la zona de compressió.

En funció dels processos de sedimentació que es produeixen en el decantador secundari, aquest compleix una doble funció (figura 1.6): separar el fang activat alhora que el compacta abans de ser retornat al procés biològic o bé purgat.

- Clarificació (zona superior): obtenir un sobrenedant clar que asseguri una bona qualitat de l'efluent respecte la concentració de SS, a la vegada que els flòculs de fang activat van decantant.
- Espessiment / compactació (zona inferior): obtenció en la zona final del decantador d'un fang suficientment concentrat per tal de que pugui ser recirculat, amb l'objectiu de mantenir una determinada concentració de fangs activats al reactor biològic que garanteixi el correcte funcionament del sistema de

tractament. Normalment, encara que no sempre, una part del fang de la zona final del decantador és purgat del sistema, és a dir, enviat a la línia de fangs de l'EDAR.

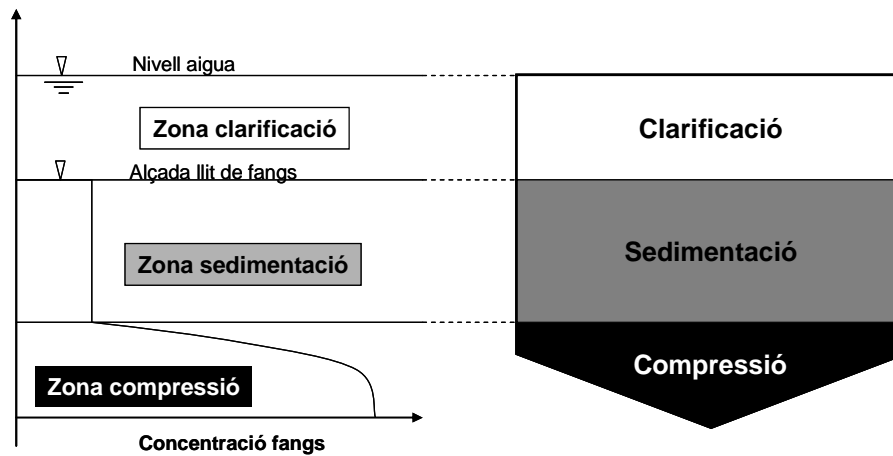


Figura 1.6. Perfil típic en profunditat de la concentració de fangs al decantador relacionat amb la representació esquemàtica de les tres zones en què poder diferenciar-se el decantador (adaptat d'Ekama *et al.*, 1997 i Jeppsson, 1996b)

Hi ha molts factors que afecten la separació sòlid-líquid d'un decantador secundari. Els més importants es poden classificar en quatre grans grups: característiques hidràuliques i dimensions externes del tanc, característiques físiques internes, condicions ambientals locals i característiques del fang. En la taula 1.2 es presenten aquests paràmetres.

Taula 1.2. Factors que afecten la separació sòlid – líquid en decantadors secundaris (Ekama *et al.*, 1997)

(1) Característiques hidràuliques i dimensions externes del tanc	(2) Característiques físiques internes
Cabals d'aigua residual (mig, punta i pluvial)	Presència zona de floculació
Àrea superficial i càrrega superficial	Sistemes de recollida del fang
Profunditat i temps de retenció hidràulica	Característiques de l'entrada
Relació de recirculació de fang	Tipus de vessador, longitud i posició
	Configuració del tanc
	Patrons de flux hidràulic i turbulència
	Corrents de convecció i de densitat
(3) Condicions ambientals locals	(4) Característiques del fang
Vent	Concentració en el reactor biològic
Temperatura en l'aire i l'aigua	Característiques de floculació, sedimentació i espessiment
	Processos biològics (desnitrificació,...)

Les dimensions externes del tanc i les característiques físiques internes són factors imprescindibles a tenir en compte en el moment de dissenyar el decantador, ja que seran determinants a l'hora de proporcionar bons resultats de clarificació de l'efluent. Ara bé, un cop dissenyat i construït el decantador, de tots els factors enumerats en la taula 1.2, els més importants a l'hora de decidir com operar el decantador són el cabals d'aigua

residual, la relació de recirculació de fang i les característiques del fang. És a dir, per aconseguir un bon funcionament del procés és indispensable conèixer la relació (figura 1.7) entre cabals (d'entrada, sortida i recirculació), concentracions (dels fangs en el reactor i recirculació) i les característiques dels fangs (floculació, sedimentació i espessiment).

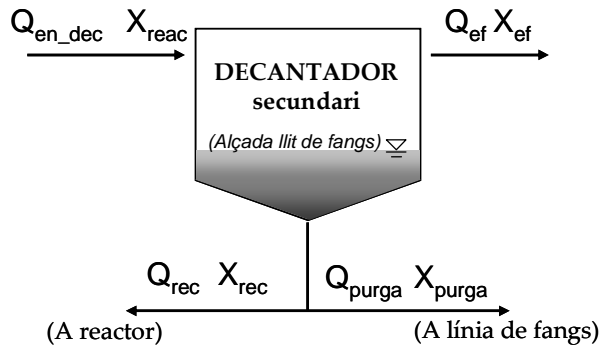


Figura 1.7. Representació esquemàtica d'un decantador secundari amb les seves respectives variables.

- Cabals. Tal i com es representa en la figura 1.7, els cabals que formen part de l'esquema d'un decantador secundari són: el cabal d'entrada al decantador (Q_{en_dec}), normalment determinat pel cabal d'entrada al reactor i el cabal de recirculació, el cabal de sortida (Q_{ef}), el cabal de recirculació (Q_{rec}) i el cabal de purga (Q_{purga}), que no sempre és present en el decantador ja que existeix la possibilitat de realitzar la purga des del reactor biològic. Els cabals més importants a tenir en compte són Q_{en_dec} i Q_{rec} , ja que són els dos factors operacionals principals que afecten la concentració de SS a l'efluent (Tsai *et al.*, 1996).
- Concentracions. En la figura 1.7 es mostren les variables de concentració que afecten a un decantador secundari: la concentració de sòlids d'entrada al decantador, que és la concentració del licor mescla provinent del reactor (X_{rec}), i la concentració de sòlids de la recirculació (X_{rec}) i de la purga (X_{purga}), que és la mateixa quan la purga es produeix des del decantador i diferent si es purga des del reactor.
- Característiques del fang. Existeixen diversos tipus de tests per avaluar les condicions de sedimentació i compressió del fang activat en el decantador secundari. Les dues mesures més utilitzades per quantificar les característiques de sedimentació del fang activat són l'Índex Volumètric de Fang (IVF) i la Velocitat de Sedimentació Zonal (VSZ) (WEF, 1998). Un tercer mètode consisteix en mesurar l'alçada del mantell de fangs.
- IVF (Mohlman, 1934): L'IVF o també anomenat índex de Mohlman és el test més utilitzat per determinar les condicions de sedimentació del fang activat. Aquest índex es descriu com el volum (en ml) ocupat per 1 g de fang després de decantar 30 minuts en repòs. El test es realitza col·locant una mostra de licor mescla en una proveta d'un litre i mesurant el volum després de 30 minuts (mesura anomenada V30 o capacitat de sedimentació del licor mescla) i la concentració de Sòlids en Suspensió del Licor Mescla (SSLM) corresponent. L'IVF es calcula segons l'equació 1.4.

$$\text{IVF}(\text{ml}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{V_{30}(\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}) \times 1000(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1})}{\text{SSLM}(\text{mg}\cdot\text{l}^{-1})} \quad (1.4)$$

Un fang amb un valor d'IVF de 100 ml·g⁻¹ és un fang amb bones condicions de sedimentació (valors òptims de sedimentació es situen per sota de 100). Valors d'IVF per sobre de 150 ml·g⁻¹ són associats típicament amb el creixement de filamentoses. Com que l'IVF és un test empíric, està subjecte a errors significants. Per exemple, si un fang amb una concentració de 10000 g·m⁻³ no sedimenta, passats 30 minuts, el valor d'IVF serà de 100. Per evitar resultats erronis i permetre una comparació significativa de resultats d'IVF de diferents fangs, s'utilitza un altre índex anomenat Índex Volumètric de Fang Diluït (IVFD) (Jenkins *et al.*, 2003). En el test de l'IVFD (Stobbe, 1964) la mostra de fang és diluïda amb efluent del procés fins que el volum sedimentat en 30 minuts és de 250 ml · l⁻¹ o menor. Llavors es realitza la mesura d'IVF. Una altra modificació del test d'IVF és l'Índex Volumètric Específic Agitat a 3.5 g · l⁻¹ (IVEA_{3.5}) (White, 1976), que es defineix com el volum (en ml) ocupat per un gram de fang després de decantar 30 minuts amb agitació lenta per tal d'evitar 'l'efecte paret' de la proveta que es produeix amb la mesura d'IVF. L'IVEA_{3.5} és considerat el millor paràmetre dels tres (Ekama *et al.*, 1997) però no és fàcil d'obtenir ja que requereix un equipament específic per poder realitzar el test. Per tant, malgrat les mancances del test d'IVF, actualment continua essent el més utilitzat en les EDAR. La seva mesura es realitza en discontinu en el laboratori, encara que actualment ja existeixen sondes per poder-ne fer un seguiment en continu.

- Velocitat de sedimentació zonal (VSZ): és definida com la velocitat de descens de la interfase sòlid-líquid en un test de sedimentació en discontinu. Segons Wanner (1994), és la tècnica que simula millor les condicions durant la sedimentació en decantadors secundaris. Existeixen algunes temptatives de trobar una correlació entre l'IVF i la VSZ, com per exemple la classificació feta per Wanner (1994), presentada en la taula 1.3.

Taula 1.3. Classificació del tipus de fang segons valors d'IVF i VSZ (Wanner, 1994)

Tipus de fang	IVF (ml · g ⁻¹)	VZS a 3 g · l ⁻¹ (m · h ⁻¹)
Bona sedimentació	<100	<3
Poca sedimentació	100 – 200	2 – 3
Bulking (proliferació filamentoses)	> 200	< 1.2

- Alçada de fangs: s'anomena alçada de fangs a la profunditat on trobem el mantell de fangs, format per l'espessiment dels sòlids al fons del decantador. Per tant, amb aquest paràmetre es mesura la profunditat en la qual es troben els sòlids en el decantador. Generalment, l'alçada de fang es mesura manualment, amb més o menys freqüència diària segons l'EDAR. Aquesta mesura es pot realitzar de diverses maneres, la més habitual és utilitzant una barra, o amb mètodes més sofisticats (i molt menys utilitzats) com sensors d'ultrasons, sensors de densitat i discos 'secchi'. Actualment hi ha diferents detectors d'alçada de fang en el mercat, una altra cosa és que es trobin instal·lats en la majoria d'EDAR, de manera que la pràctica de mesurar-la manualment és la més utilitzada tot i ser la més exposada a errades.

Operació del decantador secundari

Aconseguir un efluent amb una baixa concentració de SS, dependrà en gran part de si s'opera de manera adequada el decantador. Sempre i quan no hi hagi problemes de sedimentació del fang (com pot ser, un episodi de bulking o foaming), operar amb un cabal de recirculació òptim proporciona un sobrenedant clar i un fang compactat correctament a la zona final del decantador.

Existeixen diferents maneres de recircular des del decantador secundari. Segons el manual d'operació de la WEF (1996) hi ha tres estratègies principals d'operació:

- Recirculació a cabal constant, independentment del cabal d'entrada.
- Recirculació a un cabal fixat en funció del cabal d'entrada.
- Cabal de recirculació variable en funció d'optimitzar la situació del decantador.

1. Recirculació a cabal constant: aquesta estratègia consisteix en treballar amb un cabal de recirculació continu independentment del que entra al reactor i/o decantador. Es recircula a cabal constant durant tot el dia, augmentant o disminuint el valor segons les condicions de sedimentació del fang activat. Aquesta manera d'operar comporta una variació contínua de la concentració de biomassa al reactor. Quan el cabal d'entrada és mínim, el reactor actua de magatzem per la biomassa. A mesura que incrementa el cabal d'entrada, el fang activat passa al decantador i l'alçada del mantell de fangs també va augmentant. Quan el cabal d'entrada és màxim, el decantador actua com a magatzem. L'alçada de fangs varia constantment al mateix temps que els SSLM van passant de reactor a decantador amb més o menys quantitat segons la variabilitat del cabal d'entrada.

2. Recirculació en funció del cabal d'entrada: generalment quan es parla de recircular segons el cabal d'entrada, es relaciona amb l'estratègia de recircular directament proporcional a aquest cabal. No obstant, també cap la possibilitat de recircular segons el cabal d'entrada però de forma inversament proporcional.

- Recirculació directament proporcional al cabal d'entrada: recircular segons aquesta estratègia significa que quan entra poc cabal, cal disminuir el cabal de recirculació i quan entra molt cabal, augmentar-lo. D'aquesta manera s'intenta mantenir una concentració constant al reactor i decantador. No obstant, quan es produeixen pics de cabal, recircular directament proporcional al cabal d'entrada pot comportar problemes. En aquest cas, es corre el risc de que es produeixi un escapament de sòlids al decantador degut a un xoc hidràulic al decantador: si al pic de cabal d'entrada se li suma una recirculació elevada, el cabal d'entrada al decantador és molt elevat, de manera que si el decantador no té unes condicions de sedimentació òptimes, pot produir-se un rentat de fangs a medi receptor a la vegada que l'entrada d'un cabal tan alt dona lloc a turbulències que poden trencar el flocul.
- Recirculació inversament proporcional al cabal d'entrada: amb aquesta estratègia es varia la recirculació amb l'objectiu de mantenir constant la càrrega hidràulica al decantador. Quan es produeix un pic de cabal, en lloc

de recircular molt (com en el cas anterior) s'opta per recircular poc per tal de mantenir els sòlids al decantador i evitar un rentat ocasionat per un xoc hidràulic. Si al contrari, el cabal d'entrada és baix, llavors es recircula molt per tal de mantenir la càrrega a l'entrada del decantador.

3. **Recirculació variable en funció d'optimitzar la situació del decantador:** variar la recirculació per tal d'optimitzar la situació del decantador té dues vessants. Una primera, centrada en recircular amb l'objectiu de minimitzar l'alçada del mantell de fangs i per tant, mantenir el màxim de sòlids al reactor i una segona, basada en variar la recirculació per optimitzar la concentració i el temps de retenció del fang al decantador. Hi ha diferents tècniques per determinar quin és el cabal a recircular per una determinada EDAR. El resultat d'una recirculació correcta és un fang i una qualitat de l'efluent òptims. La relació entre l'aliment i els microorganismes (F:M) i l'edat del fang són controlats per la purga. Per tant, el principal objectiu de recircular el fang és mantenir la biomassa necessària en el reactor. En segon pla queda minimitzar l'alçada del mantell de fangs i maximitzar les concentracions del fang de recirculació dins d'un rang desitjat (WEF, 1996).
- Control directe de l'alçada de fangs: una manera de decidir el cabal a recircular és en funció de l'alçada de fangs del decantador. L'alçada de fangs augmenta a mesura que entren més sòlids dels que surten. L'objectiu d'aquesta estratègia és mantenir un valor desitjat d'alçada de fangs, de manera que es varia la recirculació (s'augmenta o es disminueix) per tal d'aconseguir aquest valor. Aquest punt de consigna es determina normalment per l'experiència: ha de ser un valor prou baix per permetre una sedimentació eficient i prou alt per emmagatzemar suficient quantitat de sòlids i permetre un correcte espessiment del fang que ha de ser recirculat. Normalment aquest valor es mou entre 0.3 i 0.9 metres (WEF, 1996).
 - Recirculació segons les condicions de sedimentació del fang: a l'hora de decidir el cabal a recircular és molt important saber en quines condicions es troba el fang activat. Existeixen diferents maneres d'utilitzar aquesta informació per fixar l'estratègia de recirculació.
 - Recirculació amb major o menor proporció al cabal d'entrada segons les condicions de sedimentació del fang, mesurades per la V30.
 - Recirculació en funció de l'optimització de la concentració de sòlids de la recirculació i el temps de retenció del decantador. Coneixent les condicions de sedimentació que presenta el fang, s'estima el temps que es necessita per poder decantar correctament: com millor decanti el fang, menys temps serà necessari perquè es compacti al fons del decantador. Si el fang presenta una bona sedimentació, es disminueix la recirculació, mentre que si el fang presenta problemes de separació, s'augmenta la recirculació, sense oblidar que com pitjor decanti el fang menys quantitat de fang quedarà concentrada al fons del decantador per molt temps que passi. Si es produeixen problemes de separació, és possible haver d'actuar amb mesures més dràstiques, com per exemple la cloració en cas de proliferació de filamentoses o l'addició de coagulants / floculants.

- Existeixen altres alternatives de recirculació, basades per exemple en el balanç de masses al reactor, balanç de masses al decantador,... etc.

I.1.3. Control de processos.

Les condicions en una EDAR canvien constantment segons el cabal i les condicions de l'aigua residual a tractar. Aquesta variabilitat comporta desviacions dels valors ideals en què hauria de treballar el procés, implicant una disminució de l'eficàcia del procés. El control de les variables dels processos d'una EDAR es realitza generalment mitjançant l'ajust de les condicions d'operació (cabals, aeració,...) a través d'una sèrie de variables anomenades variables manipulades (Baeza, 1999).

El control de l'operació dels SFA és complex degut a les pertorbacions que pateixen i a la dificultat de realitzar un seguiment en continu de totes les variables per conèixer al detall com es desenvolupen el processos. El SFA d'una EDAR urbana es veu afectat no només per les pertorbacions de l'afluent (tant en quantitat com en qualitat) sinó també per pertorbacions pròpies degudes a avaries del sistema i altres factors. És per tot això que resulta imprescindible fer un seguiment en continu del funcionament de l'EDAR i actuar (controlar) en funció de la informació obtinguda.

I.1.3.1. Estructures de control

A l'hora de dissenyar un sistema de control cal preguntar-se pels objectius a aconseguir. Hi ha tres necessitats bàsiques que qualsevol sistema de control ha de complir: disminució o eliminació de pertorbacions externes, estabilització del procés i optimització del rendiment del procés a controlar. Per dur a terme aquests objectius generals es poden adoptar diferents metodologies de control (Stephanopoulos, 1984; Seborg, 1989; Aström, 1990), presentades a continuació, a mode de resum.

- Control en llaç obert: normalment és aquell control que du a terme l'operari de manera manual. Aquest tipus de control se l'anomena de llaç obert ja que no hi ha una connexió directa entre el valor desitjat al qual es vol treballar (punt de consigna), el valor instantani de la variable de procés i l'acció proporcionada a la variable manipulada (figura 1.8).

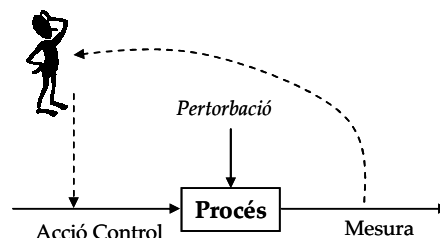


Figura 1.8. Esquema de control manual (llaç obert)

- Control per retroalimentació (feedback): adoptar aquesta estructura de control significa mesurar mitjançant un sensor en continu la variable controlada per tal de comparar en cada moment els valors obtinguts amb un valor de consigna preestablert per l'operador del sistema (valor amb el qual es vol treballar). A partir de l'error existent entre el valor desitjat i el real, el controlador fixa l'actuació a realitzar en el procés a través de la modificació de la variable manipulada (figura 1.9). Aquest tipus de control realitza l'actuació només quan s'ha produït la desviació del valor desitjat, de manera que no evita desviacions sobre el valor de consigna sinó que intenta minimitzar l'error produït. Una millora d'aquesta metodologia és el control en cascada, que estableix dos llaços, un exterior que varia el valor de consigna i un interior que ajusta la diferència entre el valor mesurat i el valor desitjat.

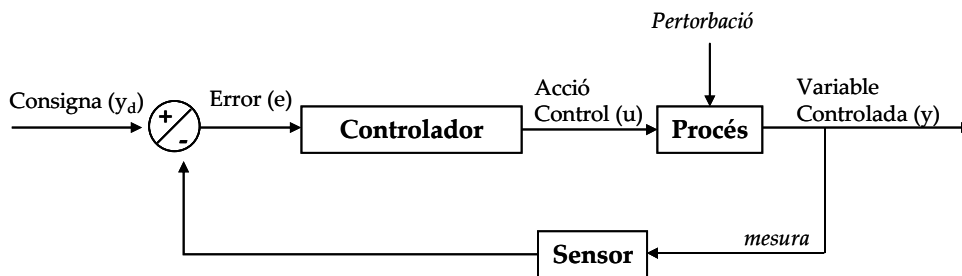


Figura 1.9. Esquema de control per retroalimentació

- Control anticipat (feedforward): mentre que el control per retroalimentació només actua quan s'ha produït una desviació del valor de la variable controlada respecte el valor de consigna, el control anticipat intenta actuar abans de que es produeixi la pertorbació que allunya el sistema de les condicions desitjades (figura 1.10). Per tant, el control anticipat analitza la pertorbació abans de que entri al procés a controlar i es determina l'acció de control necessària per tal de minimitzar el seu efecte. La dificultat de disposar de models eficients que permeten definir aquesta acció, conjuntament amb la pràctica impossibilitat d'identificar totes les pertorbacions possibles en un sistema, fa que aquest tipus de control no sigui utilitzat de forma individual sinó que normalment treballi acoblat a un llaç de regulació per retroalimentació que permeti en tot moment conèixer i ajustar les desviacions de la variable controlada.

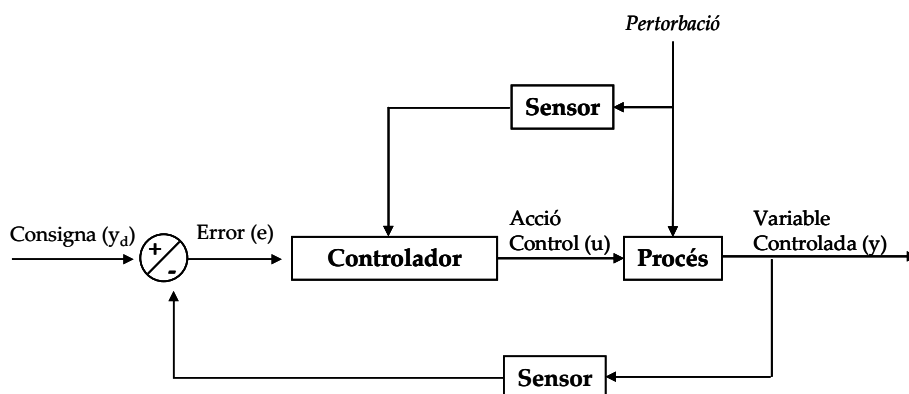


Figura 1.10. Esquema de control anticipat amb un llaç de retroalimentació acoblat.

- Control adaptatiu: aquest tipus de control consisteix bàsicament en un estimador de paràmetres i un algoritme de control (figura 1.11).

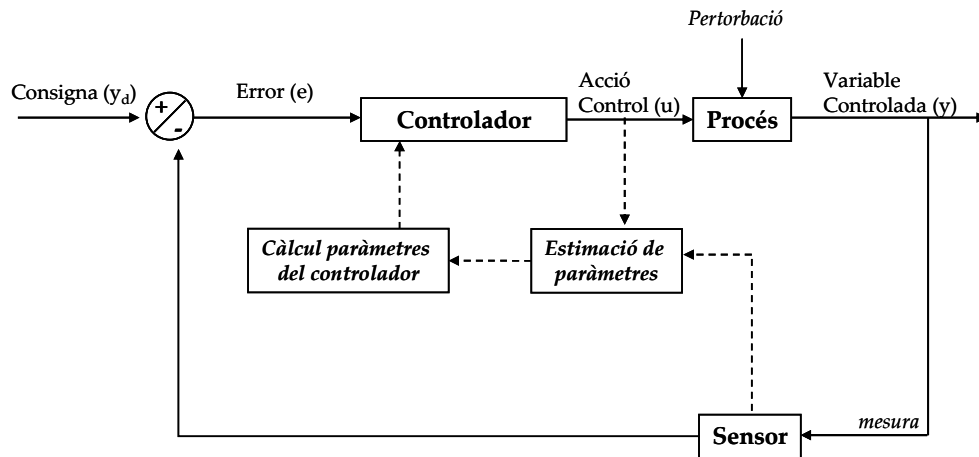


Figura 1.11. Esquema de control adaptatiu.

L'ajust dels paràmetres de control es realitza generalment a partir de les mesures en línia del procés i d'un model de comportament, que permet la seva sintonia al llarg del procés. Existeixen diferents tipus de control adaptatiu segons la forma en que es sintonitzen els paràmetres, els més coneguts són els controladors autosintonitzables, control amb model de referència i control predictiu. A més, l'estimació pot fer-se de diverses maneres: filtres de Kalman estesos, ajust per mínims quadrats, filtres adaptatius, etc.

I.1.3.2. Acció de control

Existeixen dues maneres bàsiques d'actuació respecte la senyal d'error detectada:

- Acció de control independent de la magnitud de l'error (ON/OFF): el controlador funciona a través d'actuadors que o be estan totalment oberts (ON) o totalment tancats (OFF). Aquest sistema té l'inconvenient de que mai s'assoleix el punt de consigna predeterminat, sinó que els valors de la variable mesurada van variant al voltant del punt de consigna.

- Acció de control en funció de l'error: en el cas que sigui necessari que la variable controlada no tingui oscil·lacions sinó que es mantingui a valors molt propers al punt de consigna, llavors s'ha de recórrer a accions de control que no només tinguin en compte la diferència entre el punt de consigna i el valor real si no que actuïn en funció del grau d'error que s'està cometent. Els algoritmes del tipus PID (equació 1.5), també anomenats controladors clàssics, han estat els més utilitzats en processos industrials. Aquests algoritmes són la combinació de tres accions de control, proporcional (P), integral (I) i derivatiu (D) de manera que es poden utilitzar diferents combinacions segons l'aplicació.

$$u(t) = K_C \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_{t_0}^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1.5)$$

- On $u(t)$ és l'acció de control en funció del temps
 $e(t)$ és l'error en funció del temps, la diferència entre el valor desitjat i el valor real mesurat definit com $e(t) = y_d(t) - y(t)$
 $y_d(t)$ és el valor de consigna (valor desitjat) en funció del temps
 $y(t)$ és al valor mesurat en funció del temps
- K_c és el guany proporcional, constant de sintonització del controlador
 T_i és el temps integral, constant de sintonització del controlador
 T_D és el temps derivatiu, constant de sintonització del controlador

Aquests algoritmes tenen en compte la distància a la qual es troba la variable controlada del punt de consigna (acció Proporcional), a quina velocitat s'hi està aproximant o allunyant (acció Derivativa) i l'històric acumulat d'errors que s'han comès (acció Integral). Generalment, aquests sistemes funcionen satisfactòriament en aquells processos on la relació entre les variables del procés és lineal o es pot aproximar a comportaments lineals. No obstant, en aquells sistemes en que les variables del procés es relacionen de manera fortament no lineal, aquest sistema de control no sempre és el més adequat, havent de recórrer a altres tipus de control. Els sistemes de control avançats són, en part, dissenyats per enfrontar-se a les no-linealitats dels processos a controlar (Zamarreño i Vega, 1999).

Un dels sistemes de control que avui en dia està obtenint resultats positius en el control de processos fortament no lineals, és el control basat en lògica difusa. Aquest tipus de control té com objectiu tractar matemàticament el coneixement d'experts acostumats a fer un control manual del procés. La lògica difusa proporciona una solució pràctica i senzilla pel control de sistemes complexos o poc definits, com és, per exemple, el tractament biològic de les aigües residuals, ja que ofereix un marc rigorós per resoldre numèricament problemes de controlabilitat aprofitant el coneixement d'experts en el funcionament del procés, sense la necessitat d'utilitzar models matemàtics complexos.

I.1.4. Control d'EDAR

Qualsevol EDAR hauria de funcionar a fi d'aconseguir almenys els següents tres objectius bàsics: complir amb els requeriments de l'efluent, evitar o minimitzar els efectes de les possibles pertorbacions del procés i optimitzar l'operació per minimitzar el cost de l'operació. No obstant, en massa ocasions, les EDAR treballen simplement fent un seguiment de la qualitat de l'efluent per complir amb el primer dels objectius que s'han anomenat. Tradicionalment s'ha aconseguit obtenir bons rendiments d'eliminació de MO confiant amb el disseny de les instal·lacions. Aquest disseny de mètode tradicional comporta treballar amb grans volums, excés d'aeració i de dosificació química. En conseqüència, moltes EDAR han estat sobredimensionades de manera que durant molt de temps no han existit incentius per millorar-ne l'operació (Olsson i Newell, 1999).

Ara bé, amb el pas del temps, les EDAR ja no es troben sobredimensionades (molts cops per l'augment demogràfic o consum d'aigua) i els requeriments de l'efluent cada vegada són més (eliminació de nutrients) i més

restrictius. En conseqüència, s'ha vist necessari recórrer al control de processos per poder minimitzar la influència de les variacions de cabal i pertorbacions típiques del procés i assegurar un bon funcionament de l'EDAR. Per tant, la instrumentació, control i automatització s'han convertit en aspectes cada cop més utilitzats per poder minimitzar l'efecte de les pertorbacions del procés i obtenir una bona qualitat de l'efluent, amb el mínim cost d'operació.

Depenent del tipus de procés, disponibilitat d'equips avançats, instrumentació avançada, i altres, existeix un ampli ventall d'estratègies de control que es poden implementar en una EDAR. A continuació es descriuen els principals llaços de control d'un SFA que actualment es porten a terme.

1. Control de l'Oxigen Dissolt (OD): amb aquest control es pretén mantenir una concentració òptima d'OD al reactor biològic en funció de les necessitats del procés. Aquest tipus de control és considerat com el més important, ja que l'OD és una variable clau en l'operació dels SFA, tant pel seu rendiment com per la seva eficiència energètica. Escollir el valor òptim de referència (la consigna d'OD) requereix bastant precisió i no sempre és una tasca fàcil.

Els dos objectius bàsics d'aquest control són: aconseguir una concentració d'OD suficientment alta per mantenir l'activitat microbiològica adequada i suficientment baixa per estalviar energia. La figura 1.12 representa una opció de llaç de control per retroalimentació per controlar l'OD d'un reactor biològic aeròbic.

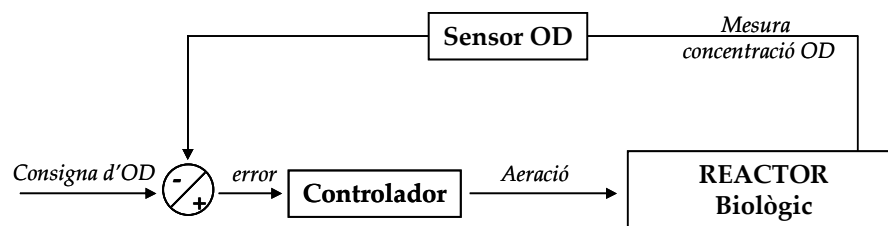


Figura 1.12. Exemple d'un esquema de control per retroalimentació de l'OD en un reactor biològic d'un SFA.

2. Control de recirculació: l'objectiu principal de la recirculació és mantenir la quantitat suficient de biomassa al reactor. A més d'aquesta funció, mitjançant el control de la recirculació es pot aconseguir també un nivell òptim de fangs al decantador de manera que es redueixi la concentració de SS i la Demanda Biològica d'Oxigen (DBO) a l'efluent així com un augment de la concentració de fangs al decantador que es tradueix en una reducció del cost de bombeig i espessiment. Bàsicament, la recirculació es controla segons el cabal d'entrada o segons la situació del decantador (alçada de fang, qualitat del fang,...). L'inconvenient principal en aquests llaços de control és la instrumentació (sondes d'alçada de fang (AF), SS i cabalímetres) que no sempre es troba en les EDAR. Les figures 1.13 i 1.14 presenten dos dels possibles llaços de control de recirculació que es poden dur a terme en una EDAR.

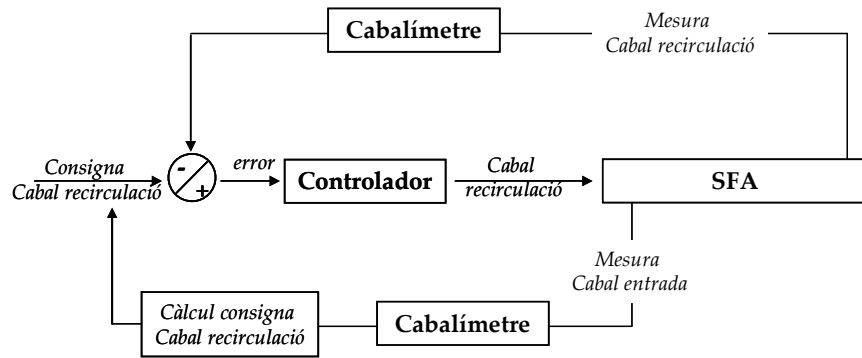


Figura 1.13. Esquema de control de la recirculació externa de fangs a partir del cabal d'entrada

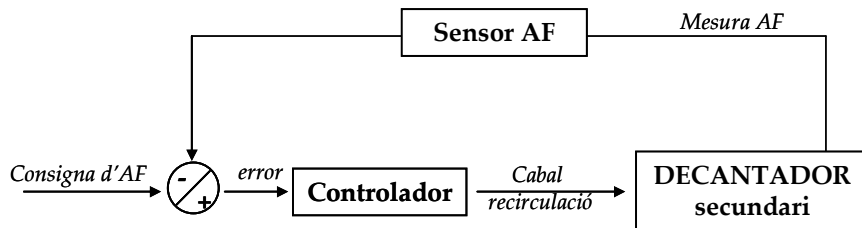


Figura 1.14. Esquema de control per retroalimentació de la recirculació externa de fangs a partir de l'alçada de fangs

3. Control de la purga: amb aquest tipus dellaç es pretén mantenir l'edat cel·lular òptima del procés de manera que es faciliti una estabilitat al procés que comporti un augment de l'eficàcia de l'eliminació de MO, SS i nutrients, un control de les escumes i de la proliferació de microorganismes filamentosos, una reducció dels costos d'espessiment i un estalvi energètic (Ekster, 2001). En l'exemple de la figura 1.15 es presenta un dels diversos esquemes que pot presentar unllaç de control de la purga. En aquest cas es mesura els SS del reactor i els SS i el cabal de la purga per calcular l'edat cel·lular real i comparar-la amb l'edat òptima a la qual es vol treballar. A continuació es manipula el cabal de purga per aconseguir arribar al punt de consigna d'edat cel·lular. A l'igual que elllaç de control de la recirculació, l'inconvenient d'aquests tipus de control és la disponibilitat de la instrumentació adequada, ja que, per exemple, actualment l'ús de sensors de sòlids no es troba generalitzat en les EDAR.

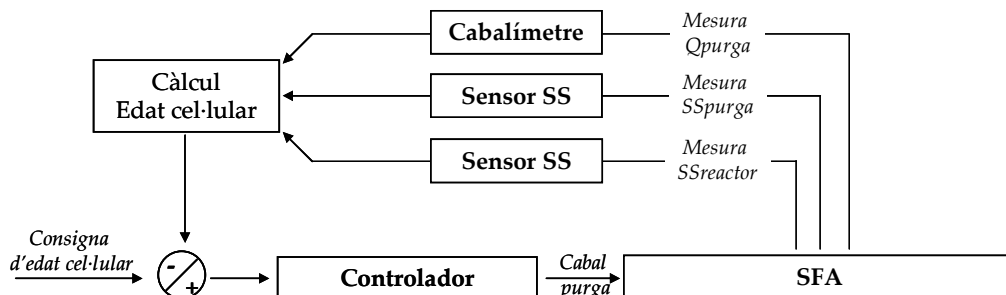


Figura 1.15. Exemple d'un esquema de control per retroalimentació de la purga a partir del càlcul de l'edat cel·lular.

Existeixen altres llaços de control no tant àmpliament utilitzats, com la distribució uniforme de la recirculació als reactors biològics, distribució uniforme del licor mescla als decantadors secundaris, la gestió de l'aigua de

tempesta, regular els retorns de la línia de fangs, el cabal de recirculació interna en l'eliminació biològica del nitrogen,...etc.

I.1.5. Protocol Benchmark

Una manera factible i eficient d'avaluar i comparar diverses estratègies de control per una EDAR és mitjançant estudis de simulació basats en models. No obstant, és important acordar una metodologia comuna per tal de comparar de manera objectiva l'eficàcia d'aquestes estratègies de control en el procés d'una determinada EDAR. El 'Task Group on Respirometry of the International Water Association (IWA)' i el 'European COST actions 682 and 624' van desenvolupar una metodologia estàndard anomenada Benchmark (Spanjers *et al.*, 1998; Copp, 2002). El Benchmark és un entorn de simulació de plataforma-independent que defineix un esquema d'EDAR, un model de simulació, dades d'entrada, procediments i criteris d'avaluació per comparar de manera objectiva l'eficàcia dels controls (Copp, 2002).

Es va desenvolupar un model d'EDAR anomenat EDAR Benchmark basat en el model ASM1 (Henze *et al.*, 1987) pels processos biològics i el model de 10 capes (Takács *et al.*, 1991) pels processos de sedimentació. Aquesta EDAR és proporcionada en diferents plataformes de simulació com BioWin™, EFOR™, GPS-X™, Matlab-Simulink™, Simba®, STOAT™, WEST® i un codi definit per l'usuari amb FORTRAN (Alex *et al.*, 1999; Pons *et al.*, 1999). L'EDAR Benchmark permet l'aplicació i comparació d'estratègies de control innovadores per diferents escenaris d'afluent, corresponents a condicions de temps sec, de pluja i tempesta. L'eficàcia de l'estratègia de control sobre el procés de l'EDAR Benchmark s'avalua mitjançant l'aplicació de diferents criteris d'avaluació dels resultats de les simulacions.

I.2. LA Lògica Difusa. SISTEMES DE CONTROL BASAT EN Lògica Difusa.

I.2.1. La lògica difusa

Cal anar fins inicis del segle XX per trobar en la lògica multivavaluada de Lukasiewicz i Gödel els orígens de la lògica difusa (LD). Ara bé, la història data el seu naixement pròpiament dit l'any 1965, quan Lofti A. Zadeh va publicar el primer treball sobre conjunts difusos 'fuzzy sets' (Zadeh, 1965). Aquest treball va tenir una profunda influència sobre el pensament de la incertesa ja que no només qüestionava la teoria de la probabilitat com l'única representació de la incertesa, sinó també els ciments sobre els quals es basava la teoria de la probabilitat: la lògica clàssica binària (Klir i Yuan, 1995).

Durant molt de temps, la lògica subjacent en la resolució de problemes ha estat limitada a la lògica binària: zero o u, vertader o fals, blanc o negre... La LD va néixer de les limitacions que presentava aquesta solució clàssica binària, de manera que aquesta nova lògica va permetre incloure el concepte de grisos, del rang de valors entre "zero" i "u", i de que les coses no tenen perquè ser totalment certes o falses.

La LD es diferencia de la lògica clàssica (bivalent) en dos aspectes bàsics:

1. La continuació dels valors vertaders permesos. La LD és una valoració continua del tema bivalent establert per Aristòtil, Boole i Frege. La veritat en el marc d'aquesta lògica ve donada en graus. La lògica bivalent és un cas especial de la LD ja que si s'acoten suficientment els valors verdaders d'un sistema difús, s'arribarà un altre cop a la lògica clàssica.
2. La veritat pot existir en la LD com una quantitat difusa en lloc de discreta (que és com la defineix la lògica clàssica). Els valors vertaders difusos poden ser expressats en declaracions com 'alguna cosa', 'possiblement' o 'tipus de veritat'. La certesa no té perquè ser discreta. Que la certesa pugui ser difusa permet modelar més completament el concepte humà de certesa en la realitat.

El nom de LD ha donat lloc a confusions, ja que es pot caure en l'error de definir-la com una lògica imprecisa. No obstant, al contrari del que pot fer pensar el seu nom, la LD està basada en fonaments matemàtics, igual de rigorosos que els fonaments del càlcul o la física. Per tant, la LD no és imprecisa, sinó que és un tipus de lògica que tracta de manera inherent conceptes vagues, difusos, a la vegada que proporciona un mètode rigorosament precís per prendre decisions amb les que poder actuar. Els principis d'aquesta nova lògica potencien l'ús del nostre raonament humà, la nostra capacitat natural de classificar i de fer un raonament aproximat mitjançant una estructura que permet representar graus de certesa d'una manera compatible amb els sistemes actuals.

La LD és, ara per ara, l'últim pas en la manipulació i representació del coneixement humà, que va començar fa dos milers d'anys amb Aristòtil. La seva principal contribució és l'aparició d'una metodologia pel càlcul, raonament i programació amb paraules – una metodologia basada en el concepte d'una variable lingüística i el càlcul de regles difuses (Heske i Heske, 1999).

I.2.2. Aplicacions de la lògica difusa

La matemàtica basada en la LD ha demostrat una gran eficàcia en molts camps aplicats. Els sistemes basats en lògica difusa (anomenats també sistemes difusos) han estat introduïts en un ampli ventall d'aplicacions, des de control, processament de senyals, comunicacions, circuits integrats de manufactures i sistemes experts, fins als negocis, medicina, psicologia, etc. Segons Passino i Yurkovich (1998), algunes àrees d'aplicació potencial de la LD en enginyeria són:

- Aeronàutica / Astronàutica: control de vols, control de motor, sistemes electrònics, diagnòs de falles, navegació i control de satèl·lits...
- Sistemes automatitzats de carretera: control de la direcció, frenada i acceleració pels vehicles.
- Automòbils: control del motor, suspensió, transmissió i frens.
- Vehicles autònoms: de terra i submarins
- Sistemes industrials: control del procés de programació.
- Indústria del motor: control del motor, distribució/control de la potència i estimació de càrrega.

- Control de procés: control de temperatura, pressió i nivell, diagnosi de falles, control de columnes de destil·lació i processos de dessalinització.
- Robòtics: control de posició i planificació de trajectòries.

L'aplicació de la lògica difusa en el camp de control automàtic de processos ha estat, i és, un èxit impressionant (Wang, 1997). Durant la dècada dels 70 van aparèixer els primers controladors basats en lògica difusa (CLD) per sistemes reals. L'any 1975, Mamdani i Assilian van establir l'estructura bàsica d'un controlador difús i l'aplicaren per controlar un motor de vapor. Els seus resultats, pioners en aquest camp, van ser publicats en l'article "An experiment in linguistic synthesis with a logic controller" (Mamdani i Assilian, 1975). Tres anys més tard, l'any 1978, Holmblad i Østergaard desenvoluparen el primer controlador per un procés a escala industrial a Dinamarca, un controlador difús per un forn de ceràmica. L'any 1980, Sugeno va crear la primera aplicació basada en lògica difusa al Japó, un control difús d'una planta de purificació d'aigua de Fuji Electric.

No obstant, encara que durant més de trenta anys s'ha descrit i estudiat la LD, no ha estat fins la darrera dècada que ha despuntat i aparegut en el món comercial i de l'enginyeria. A finals del vuitanta, els japonesos van començar a prestar atenció a aquesta tècnica quan una companyia japonesa va incorporar la lògica difusa per controlar la velocitat i l'aturada d'un metro a Sendai. Aquesta va ser i encara és, una de les aplicacions més significatives de la LD. A partir de llavors, durant els anys 90 va haver una explosió d'aplicacions de sistemes difusos. Una gran quantitat de companyies japoneses (Mitsubishi, Canon, Minolta, Panasonic,...) utilitzaven aquestes tècniques en els seus productes i processos, com per exemple: màquines rentadores difuses (dissenyades inicialment per Matsushita Electric Industrial Company), processament d'imatges digital (Matsushita també va incorporar un estabilitzador d'imatge utilitzant un controlador difús), automòbils (transmissió automàtica difusa patentada per Nissan o un sistema global basat en lògica difusa dissenyat per Mitsubishi que controlava la transmissió automàtica, tracció, direcció de les rodes i aire condicionat), etc. A partir d'aquell moment, companyies americanes com Siemens, Omron, Motorola o Whirlpool, també van introduir sistemes difusos en la seva tecnologia.

L'ús de CLD en productes pel consumidor ha aconseguit productes que s'ajusten millor a les percepcions i reaccions humanes que no pas aquells que estan associats amb sistemes de control estàndard. Per exemple, la LD és ideal per fer ajustaments a la temperatura, velocitat i altres condicions trobades en una àmplia varietat de productes (Loe, 1991) i en aplicacions de processament d'imatges (Takagi, 1992). Ross (2004) proporciona un bon resum de varies aplicacions industrials utilitzant el CLD, incloent el control de la pressió sanguínia durant l'anestèsia (Meier *et al.*, 1992), auto-enfocament per càmeres de 35 mm (Shingu i Nishimori, 1989), estabilització d'imatges per videocàmeres (Egusa *et al.*, 1992), control adaptatiu d'un sistema de calefacció de la llar (Altrock *et al.*, 1993) i control adaptatiu d'un sistema d'acceleració d'automòbil (Cox, 1993). Hi ha una gran quantitat de literatura en articles i llibres relacionats amb sistemes de control basats en lògica difusa (veure, per exemple, Wang, 1997; Passino i Yurkovich, 1998 o Cox, 1999).

I.2.3. Característiques dels sistemes difusos

Per què s'utilitza la LD? A continuació es presenten dues bones raons per les quals la LD es perfila com una bona candidata pel control de processos:

- El desenvolupament dels controladors difusos és ràpid, de més fàcil comprensió i implementació: les regles lingüístiques del tipus 'Si-Llavors' (en anglès 'If-Then') que utilitza un controlador difús són més fàcils que les equacions matemàtiques, a la vegada que aquesta manera de modelitzar el raonament humà facilita el tractament de sistemes complexos. Que la LD no es basi en equacions matemàtiques no significa que topi amb l'obstacle de no poder obtenir una descripció matemàticament exacta quan un problema passa a ser complex sinó que és més aviat al contrari. La LD amplia el camp de les tècniques de control a aplicacions en sistemes que es troben formalment més enllà de l'àmbit dels mètodes matemàtics clàssics de control i modelització a més de ser de fàcil comprensió perquè emula el raonament humà. L'avantatge del seu ús en un control automàtic recau en la formulació del comportament de les variables d'entrada i sortida en forma de regles expressades lingüísticament ('Si- Llavors'). Per això, l'experiència pràctica dels operadors humans pot ser implementada d'una altra forma que per equacions, la qual cosa fa més fàcil la comprensió per part dels operadors i persones no expertes en el camp de l'enginyeria de control. A més a més, a part del seu baix cost de desenvolupament i manteniment, una de les raons de l'èxit de les seves aplicacions comercials són els reduïts costos d'implementació. Per tot això, la LD hauria de ser considerada com una eina més a tenir en compte pels investigadors, científics i especialment pels enginyers. De fet, actualment es troba en el centre d'atenció de la comunitat d'enginyers degut a la seva fàcil comprensió, manteniment i baix cost d'implementació. En les últimes dues dècades, la seva presència ha augmentat de manera exponencial, tant en publicacions científiques com en aplicacions reals.
- Els controladors difusos són més apropiats per controlar processos no lineals: la LD té una capacitat inherent de tractar i explotar les no-linealitats. Típicament, quan es coneix que un sistema no és lineal, s'utilitzen tècniques de linealització per aproximar-lo a un sistema lineal per tal de poder utilitzar tècniques lineals. Els efectes no lineals d'un sistema incrementen amb la seva complexitat, i quan la magnitud d'aquests efectes incrementen, les linealitzacions són cada cop més inapropiades. Existeixen solucions amb sistemes de control clàssic pels processos que poden ser linealitzats i processos amb comportament no lineal conegut analíticament. Ara bé, per processos on el funcionament d'un controlador PI / PID no és suficient i no s'aconsegueix l'ajust dels paràmetres mitjançant 'regles de sintonització', el CLD apareix com una bona alternativa partint de la base de que una manera de tractar sistemes no lineals és amb tècniques no lineals, com són els sistemes difusos. La LD es troba ben adaptada per realitzar aquesta tasca. Els sistemes difusos han estat provats suficientment per treballar amb qualsevol acció de control no lineal i modelar qualsevol sistema no lineal (Bang, 1994). Un altre teorema provat afirma que qualsevol funció no lineal contínua pot ser aproximada, de la manera tant exacta com es necessiti, amb un conjunt finit de variables difuses, valors i regles (Doso, 1992). Mentre que és cert que treballar amb sistemes no lineals pot ser delicat i difícil, existeixen tècniques amb fonaments que simplifiquen aquests esforços, com és la LD.

Els CLD proporcionen un mètode per construir algoritmes de control d'una manera fàcil a l'hora que proporciona l'habilitat de capturar el comportament de control no lineal dels humans (molt apropiada per tasques complexes). Principalment el CLD és ideal per processos que poden ser controlats adequadament per humans i que tinguin sensors per proporcionar informació similar a la utilitzada pels humans quan controlen el procés (Jaguar, 1995).

I.2.4. Terminologia i fonaments de la lògica difusa

La **lògica difusa** (també anomenada lògica borrosa) és una extensió de la lògica booleana (binària o també anomenada clàssica) que tracta el concepte de 'parcialment verdader'. Mentre que la lògica clàssica es basa en que tot pot ser expressat en termes binaris (0 o 1, blanc o negre, sí o no), la lògica difusa reemplaça els valors veritables de la lògica booleana amb graus de certesa. Això permet tractar amb valors entre zero i u, escales de grisos (figura 1.16) i amb conceptes com 'potser'.

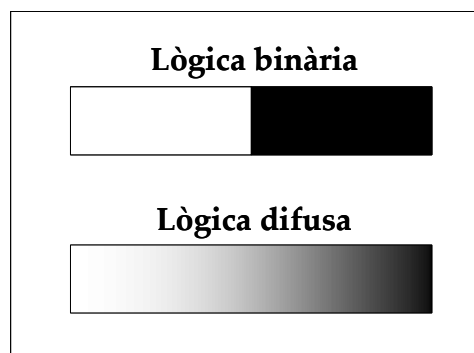


Figura 1.16. Lògica binària i lògica difusa.

Per tal de tenir en compte les infinites gradacions entre el blanc i el negre, Zadeh va suggerir una ampliació dels conjunts clàssics anomenant als nous conjunts, '**conjunts difusos**' (Fuzzy sets).

Com a conseqüència del naixement de la teoria dels conjunts difusos de Zadeh, van anar apareixent nous conceptes associats a la lògica difusa, imprescindibles per entendre més endavant els sistemes difusos. En aquest apartat es defineixen i expliquen en detall tots aquests conceptes.

I.2.4.1. Funció de pertinença.

La funció de pertinença és la funció que defineix un conjunt difús. L'objectiu d'una funció de pertinença és vincular les mesures precises i les classificacions generals. Gràficament és una funció de doble dimensió, l'eix horitzontal conté el rang de mesures precises que són utilitzades per definir una variable (com per exemple, concentracions d'oxigen dissolt) i l'eix vertical indica el grau de pertinença i se l'anomena l'eix del valor de certesa. En la figura 1.17 es troba presentada la funció de pertinença que defineix el conjunt difús 'Baix' de la variable oxigen dissolt.

I.2.4.2. Grau de pertinença.

El grau de pertinença és un valor entre 0 i 1 al qual està associat un valor del món real (de l'eix horitzontal de la funció de pertinença). En la figura 1.17 el grau de pertinença al conjunt difús 'Baix' del valor d'oxigen dissolt real $1.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ és de 0.5. Tractar amb funcions de pertinença i graus de pertinença comporta necessàriament fer ús de la notació matemàtica. Generalment, la notació $\mu_A(x)$ expressa el grau amb el que el valor discret x és un membre del conjunt difús A . Continuant amb l'exemple de la figura 1.16, l'expressió matemàtica de pertinença d'un valor discret al conjunt difús 'Baix' és $\mu_{\text{Baix}}(1.5) = 0.5$, que significa que el valor discret $1.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ de la variable oxigen dissolt té una pertinença del 0.5 al conjunt difús 'Baix'.

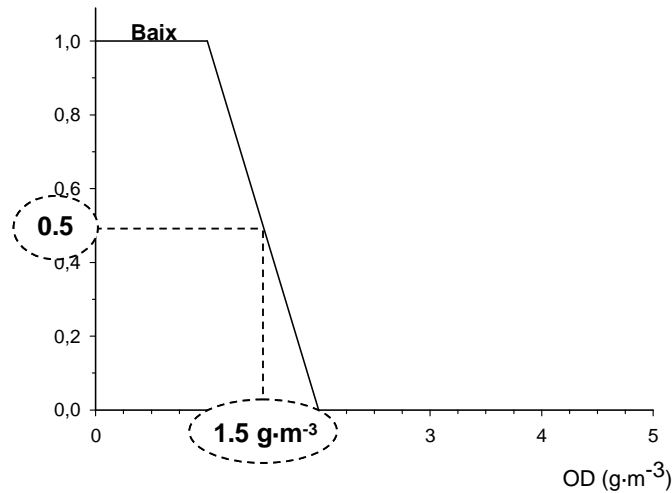


Figura 1.17. Interpretació gràfica del grau de funció de pertinença del conjunt difús 'Baix'.

I.2.4.3. Suport

El suport ('scope' en anglès) d'una funció de pertinença és el seu rang de valors, és a dir, tots els elements del conjunt difús que tenen un grau de pertinença més gran de zero. Per exemple, en la figura 1.18 el domini de la funció de pertinença del conjunt 'Baix' és $[0, 2)$ i del conjunt 'Normal' és $(1, 3)$.

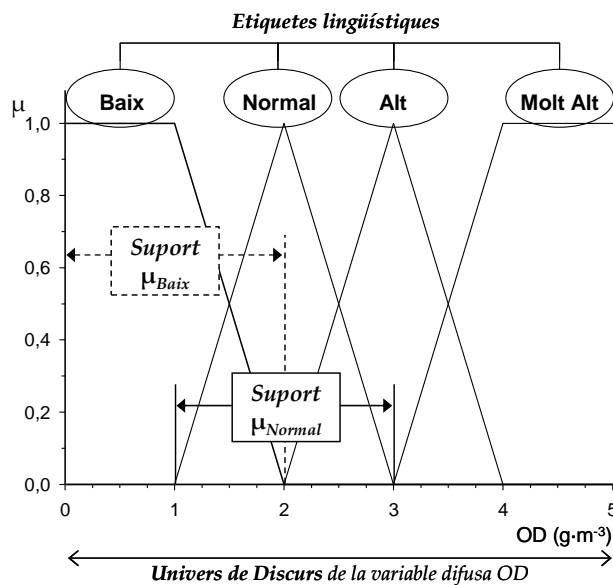


Figura 1.18. Exemple de components de les funcions de pertinença.

I.2.4.4. Etiqueta lingüística.

Normalment s'utilitza el terme d'etiqueta lingüística per referir-se a una funció de pertinença. Les etiquetes lingüístiques no són més que el nom descriptiu associat a un conjunt difús. En l'exemple de la figura 1.18, es troben representades quatre funcions de pertinença que descriuen a quatre conjunts difusos, cadascun dels quals té una etiqueta lingüística: 'Baix', 'Normal', 'Alt' i 'Molt Alt'. Posar etiquetes als conjunts difusos és el segell distintiu de la LD. Partint de que aquesta lògica va ser concebuda com una eina per capturar el raonament humà, anomenar correctament les funcions de pertinença requereix el llenguatge natural que utilitzem per descriure conceptes humans.

Sota el concepte de conjunt difús resideix la idea que els elements clau en el pensament humà no són els nombres sinó les etiquetes lingüístiques, les quals permeten que els objectes passin de pertànyer d'una classe a una altra de forma suau i flexible (Clara, 2004).

I.2.4.5. Variable difusa.

La variable difusa és aquella variable que s'utilitza en un sistema difús. Una variable difusa és definida per un conjunt de funcions de pertinença. En l'exemple de la figura 1.18, la variable difusa és l'Oxigen Dissolt (OD) i està definida per quatre funcions de pertinença (amb les seves respectives etiquetes lingüístiques), 'Baix', 'Normal', 'Alt' i 'Molt alt'. En un sistema difús, una variable difusa pot ser tant una variable d'entrada com de sortida. Les variables difuses també són anomenades variables lingüístiques. Zadeh (1975) les va definir com variables, els valors de les quals són les etiquetes lingüístiques dels conjunts difusos. Per exemple, oxigen dissolt és una variable lingüística quan els seus valors són 'Baixos', 'Normals',... en lloc de valors numèrics de concentracions. Les variables lingüístiques són la substància del raonament humà.

I.2.4.6. Univers de discurs.

D'univers de discurs és el rang de valors d'interès d'una variable difusa que es té en compte en un sistema difús. En l'extrem inferior es troba el mínim valor que interessa i en l'altra banda el valor màxim. Per exemple, en la figura 1.18, d'univers de discurs de la variable difusa oxigen dissolt és [0,5]. D'univers de discurs d'una variable difusa variarà segons el sistema, per exemple, la variable oxigen dissolt variarà el seu univers de discurs segons si es troba definida com a oxigen dissolt d'un reactor aeròbic [0, 5] o oxigen dissolt d'un reactor anòxic [0,1].

I.2.4.7. Formes de les funcions de pertinença.

La lògica difusa permet un ventall infinit de diferents formes que poden presentar les funcions de pertinença. No obstant, les formes més comunes es divideixen en tres famílies:

1. Funcions de pertinença definides mitjançant les corbes S, Z i Pi: són funcions força comunes perquè proporcionen funcions de pertinença suaus que semblen corbes de campana. Aquesta família de corbes és parametritzada de manera que un només necessita especificar el punt mig i amplada per obtenir la funció de

pertinença desitjada. Les expressions parametritzades per cada tipus de corba permeten que les transicions siguin suaus quan el output del sistema difús varia.

- S-Corba: la forma de la S-Corba és definida per una equació quadràtica (equació 1.6) mitjançant dos paràmetres, el punt mig (a) i l'amplada (b). Mentre que hi ha un precedent històric fixat per Zadeh per la definició de S-Corba, la seva forma funcional no és immutable. Les formes de les funcions de pertinença poden ajustar-se segons l'usuari.

$$\begin{aligned}
 S(x, a, b) &= 0; x < a - b \\
 &= \frac{(x - (a - b))^2}{2b^2}; a - b \leq x \leq a \\
 &= 1 - \frac{((a + b) - x)^2}{2b^2}; a < x \leq a + b \\
 &= 1; x > a + b
 \end{aligned}
 \tag{1.6}$$

- Z-Corba: la forma de la Z-Corba és definida utilitzant la definició de S-Corba (equació 1.6). De la mateixa manera també es defineix a partir de dos paràmetres: punt mig (a) i amplada (b), segons l'equació 1.7.

$$Z(x, a, b) = 1 - S(x, a, b) \tag{1.7}$$

- Pi-Corba: La corba PI és generalment amb forma de campana i és el resultat d'unir les corbes tipus S i tipus Z. En l'equació 1.8 es mostra la seva expressió matemàtica i la figura 1.19 presenta un exemple d'aquest tipus de corba, on la funció de la banda esquerra (més propera a l'eix Y) és una S-Corba i la funció de la banda dreta és una Z-Corba. De la unió d'ambdues resulta una corba tipus Pi.

$$\begin{aligned}
 Pi(x, a, b) &= S(x, a - \frac{b}{2}, \frac{b}{2}); x \leq a \\
 &= Z(x, a, a + \frac{b}{2}, \frac{b}{2}); x \geq a
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

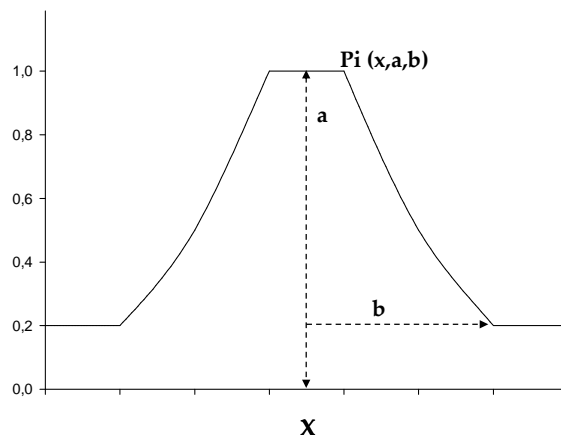


Figura 1.19. Exemple de funció de pertinença del tipus Pi-Corba. La banda esquerra correspon a una S-Corba i la banda dreta a una Z-Corba. De la seva unió resulta la Pi-Corba.

2. Funcions de pertinença tipus GAUSSIANES: unes altres corbes de campana àmpliament conegudes són la família de les gaussianes. L'inconvenient d'utilitzar la família de les gaussianes de manera estricta en representacions difuses és la infinita cua de cada costat del centre. Matemàticament, no hi ha un valor finit en aquestes funcions que resulti en un zero de grau de pertinença. A més a més, partint del fet que la família de gaussianes només descriu corbes simètriques, les seves formes no són fàcilment generalitzades a totes les aplicacions de lògica difusa. Ara bé, aplicacions de lògica difusa han adaptat la definició d'una equació gaussiana tal i com es mostra en l'equació 1.9 i la figura 1.20. En aquest cas la corba de tipus gaussià ve determinada, a l'igual que la Pi-Corba, per dos paràmetres: el centre (definit per a) i un valor que indica l'amplada de corba en forma de campana (definida per b), en funció del suport fixat per la funció (Cox, 1999). La figura 1.20 presenta un exemple de funció de pertinença gaussiana.

$$G(x; a, b) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-a}{b}\right)^2} \quad (1.9)$$

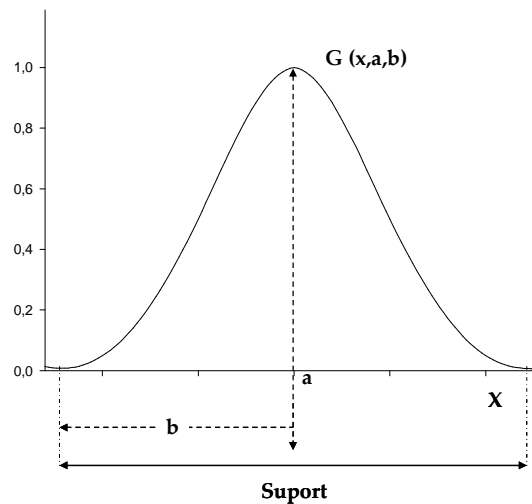


Figura 1.20. Exemple de funció de pertinença del tipus corba gaussiana.

3. Funcions de pertinença de tipus TRIANGULAR I TRAPEZOÏDAL: moltes vegades, els requeriments de memòria i restriccions de temps en l'execució no permeten l'ús de corbes S, Z o Pi. Normalment la suavitat de la sortida que pot ser obtinguda utilitzant aquesta família de funcions polinòmiques, no és necessària per resoldre acceptablement el problema. L'ús de funcions de pertinença trapezoïdals i triangulars redueix el gruix computacional dels sistemes difusos. Les funcions de pertinença triangulars i trapezoïdals van aparèixer a partir de consideracions de representació mínima i explotació màxima (Cox, 1999).

La funció de pertinença trapezoïdal pot ser entesa com una versió menys flexible de la funció definida per la Pi-Corba. La seva expressió matemàtica ve determinada per quatre paràmetres (a, b, c i d) tal i com es presenta en l'equació 1.10. La figura 1.21 presenta un exemple de representació gràfica d'aquest tipus de funcions.

$$\text{Trap}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (1.10)$$

En la realitat, la funció trapezoïdal no és utilitzada amb la seva fórmula sencera. Normalment, quan una variable difusa és definida per funcions triangulars i trapezoïdals, les funcions dels extrems es defineixen per funcions anomenades 'pseudo-trapezoïdals' ja que s'elimina un dels quatre punts que les defineixen. La figura 1.18 presenta dos exemples de funcions pseudo-trapezoïdals: la funció de pertinença del conjunt 'Baix' i del conjunt 'Molt Alt'.

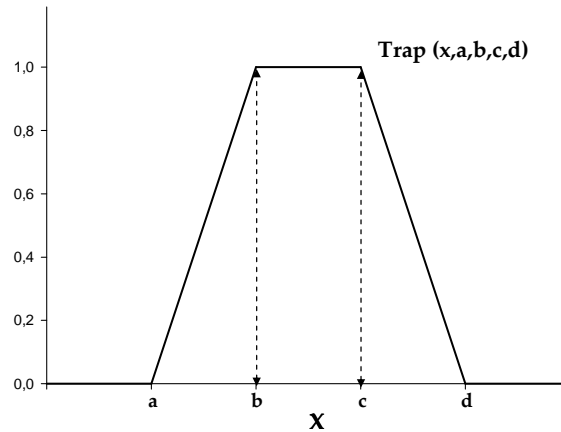
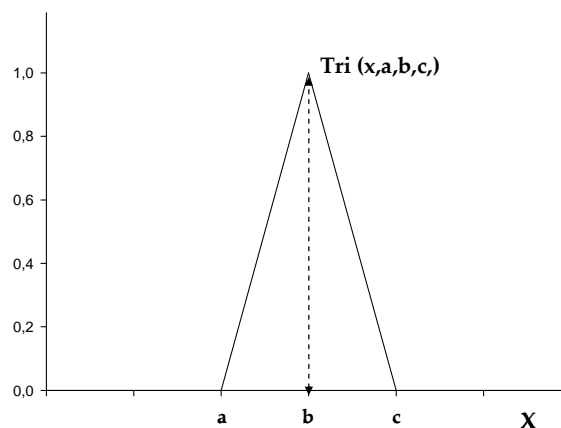


Figura 1.21. Exemple de funció de pertinença del tipus trapezoïdal.

La funció de pertinença triangular és definida per l'equació 1.11, determinada per tres punts (a, b i c). En la figura 1.22 es mostra una representació gràfica d'aquest tipus de funcions.

$$\text{Tri}(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (1.11)$$



1.22. Exemple de funció de pertinença del tipus triangular.

I.2.4.8. Operacions entre els conjunts difusos.

La lògica difusa, com qualsevol lògica, necessita un conjunt d'operadors ben definits per manipular els conjunts difusos en qüestió. Els operadors lògics difusos operen sobre els conjunts difusos d'una variable lingüística en un camí que és anàleg a les operacions Booleanes sobre les variables Booleanes (Heske i Heske, 1999). Les operacions entre conjunts difusos són la negació (NO), intersecció (I) i unió (O) i existeixen diferents operadors per realitzar tals operacions (taula 1.4).

Taula 1.4. Operadors difusos

Operacions	Funció	Operadors
I	Intersecció	T-normes
O	Unió	S-normes
NO	Complement	Operadors de negació

Operador de negació (complement difús)

L'operador complement o funció NO és una funció contínua c que transforma la funció de pertinença d'un conjunt difús A en una funció de pertinença del complement d' A segons l'expressió matemàtica 1.12.

$$c: [0,1] \rightarrow [0,1] \tag{1.12}$$

$$c[\mu_A(x)] = \mu_{\bar{A}}(x)$$

$$c[\mu_A(x)] = 1 - \mu_A(x) \text{ (segons l'operador NOT definit per Zadeh)}$$

Per tal que la funció c sigui qualificada com un complement ha de satisfer almenys els següents requeriments:

1. $c(0) = 1$ i $c(1) = 0$ (condició de contorn), si un element pertany al conjunt difús de grau zero (u), hauria de pertànyer al complement d'aquest conjunt difús de grau u (zero)
2. Per tot $a, b \in [0,1]$, si $a < b$, llavors $c(a) \geq c(b)$, (condició de monotonia) requereix que un increment del valor d'una funció de pertinença ha de resultar en una disminució o no canvi del valor de la funció de pertinença pel complement.

Operador d'unió i intersecció difusa

Encara que Zadeh va proposar el mínim per la intersecció i el màxim per la unió, hi ha infinites possibilitats de definicions dels connectors d'intersecció i unió entre dos conjunts difusos. Les formes d'intersecció són representades per normes triangulars (T-normes) i les formes d'unió per conormes triangulars (T-conormes o també anomenades S-normes) (Jager, 1995). En la taula 1.4 es resumeix el tipus d'operadors a utilitzar en cada cas.

- Unió difusa o les S-normes

Com operadors difusos per l'operació de la Unió o funció O s'utilitzen els operadors S-norma o també anomenats T-conormes. L'operador S-norma és una funció:

$$S:[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (1.13)$$

$$S[\mu_A(x), \mu_B(y)] = \mu_{A \cup B}(x,y)$$

que ha de satisfer les següents propietats:

1. element neutre $S(0,a) = S(a,0) = a$, amb aquesta condició s'indica com ha de ser la funció unió en casos extrems,
2. monotonia $S(a,b) \leq S(c,d)$ si $a \leq c$ i $b \leq d$. Aquesta propietat presenta un requeriment natural per a la unió: un increment en els valors de pertinença dels conjunts difusos hauria de resultar en un increment del valor de pertinença de la unió dels dos conjunts.
3. commutativa o simetria $S(a,b) = S(b,a)$. Aquesta condició assegura que l'ordre en el qual estan combinats els conjunts difusos no afecta el resultat.
4. associativa $S(a, S(b,c)) = S(S(a,b), c)$. Aquesta propietat permet estendre l'operació d'unio a més de dos conjunts difusos.

Entre els diferents tipus d'operadors S-normes, el més tradicional és el MAX (màxim) de Zadeh. No obstant, existeixen altres operadors, anomenats compensatoris, com la suma algebraica, suma acotada, suma dràstica... que tenen com objectiu compensar l'operador màxim estricte definit per Zadeh.

- Intersecció difusa o T-normes

Com operadors difusos per l'operació intersecció o funció I s'utilitzen els operadors T-normes. L'operador T-norma és una funció:

$$T:[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (1.14)$$

$$T[\mu_A(x), \mu_B(y)] = \mu_{A \cap B}(x,y)$$

que ha de satisfer les propietats de monotonia, commutativa o simetria i associativa explicades en les S-normes així com també, la propietat de l'element unitari:

1. element unitari $T(1,a) = T(a,1) = a$, amb aquesta condició s'indica com ha de ser la funció en casos extrems

Dins els diferents tipus de T-normes, l'operador més tradicional és el MIN (mínim) de Zadeh. Ara bé, també existeixen altres operadors, anomenats compensatoris, com el producte algebraic, producte acotat... que van aparèixer amb l'objectiu de compensar el mínim estricte definit per Zadeh.

La relació de T-normes i S-normes és molt extensa (Lowen, 1996). En la taula 1.5 és presenten les més comunes i conegudes.

Taula 1.5. Principals T-normes i S-normes associades.

Relació de T-normes i S-normes més conegudes	
Mínim i màxim de Zadeh (Zadeh, 1973)	$T_{\min}(x, y) = \min\{x, y\}$ $S_{\max}(x, y) = \max\{x, y\}$
Producte i suma dràstic (Weber, 1983)	$T_{PD}(x, y) = \begin{cases} x & y = 1 \\ y & x = 1 \\ 0 & \text{altrament} \end{cases}$ $S_{PD}(x, y) = \begin{cases} x & y = 0 \\ y & x = 0 \\ 0 & \text{altrament} \end{cases}$
Producte i suma acotat (Lukasiewicz, Giles, 1976)	$T_{PA}(x, y) = \max\{0, x + y - 1\}$ $S_{PA}(x, y) = \min\{1, x + y\}$
Producte i suma algebraic (Bandler i Kohout, 1980)	$T_P(x, y) = xy$ $S_P(x, y) = x + y - xy$
Família de Hamacher (Hamacher, 1978)	$T_{H,\lambda}(x, y) = \frac{xy}{\lambda + (1-\lambda)(x+y-xy)} \quad \lambda > 0$ $S_{H,\lambda}(x, y) = \frac{x+y-(2-\lambda)xy}{1-(1-\lambda)xy} \quad \lambda > 0$
Família de Dombi (Dombi, 1982)	$T_{D,\lambda}(x, y) = \left[1 + \lambda \left[\left(\frac{1}{x} - 1 \right)^\lambda + \left(\frac{1}{y} - 1 \right)^\lambda \right] \right]^{-1} \quad \lambda > 0$ $S_{D,\lambda}(x, y) = \left[1 + \lambda \left[\left(\frac{1}{x} - 1 \right)^{-\lambda} + \left(\frac{1}{y} - 1 \right)^{-\lambda} \right] \right]^{-1} \quad \lambda > 0$
Família de Yager (Yager, 1980)	$T_{Y,\lambda}(x, y) = 1 - \min\left(1, \left((1-x)^\lambda + (1-y)^\lambda \right)^{\frac{1}{\lambda}} \right) \quad \lambda \geq 1$ $S_{Y,\lambda}(x, y) = \min\left(1, \left(x^\lambda + y^\lambda \right)^{\frac{1}{\lambda}} \right) \quad \lambda \geq 1$
Família de Dubois i Prade (Dubois i Prade, 1986)	$T_{DP,\lambda}(x, y) = \frac{xy}{\max\{x, y, \lambda\}} \quad 0 \leq \lambda \leq 1$ $S_{DP,\lambda}(x, y) = 1 - \frac{(1-x)(1-y)}{\max\{1-x, 1-y, \lambda\}} \quad 0 \leq \lambda \leq 1$

I.2.4.9. Regles difuses. Des de la premissa fins a la conclusió.

Les regles difuses capturen l'essència del coneixement sobre el sistema expressant com les variables d'entrada del sistema es relacionen amb les de sortida. L'habilitat d'expressar regles en el nostre propi llenguatge natural accelera el procés de trobar una solució a un problema donat. Utilitzant regles del tipus sintàctic 'Si-Llavors' s'elimina el pas de el mitjancer i el consum de temps de traduir el nostre coneixement en equacions matemàtiques, arbres de decisió booleans o programes informàtics (Heske i Heske, 1999). Les regles difuses estan escrites en el nostre llenguatge, per tant, fan més fàcil i ràpida la feina de traduir el nostre coneixement.

El conjunt de regles que comprenen el coneixement, és a dir, les actuacions d'un sistema difús, s'anomena **base de regles o matriu de decisió**. Les regles poden ser vistes com regles independents que operen en paral·lel, però que al final del procés cal relacionar. La base de regles proporciona un conjunt de relacions difuses entre les variables d'entrada i les de sortida. Per exemple:

Regla 1: SI OD és Baix LLAVORS Aeració Elevada

Regla 2: SI OD és Normal LLAVORS Aeració Baixa

Regla 3: SI OD és Alt LLAVORS Aeració Off

La figura 1.23 mostra com es produeix aquesta relació. Les regles difuses estan construïdes combinant **proposicions difuses**, com per exemple 'l'oxigen dissolt és baix'. Cada proposició dóna un estat sobre el possible valor de la variable lingüística que entra en joc. Continuant amb l'exemple de la figura 1.23, amb una funció de pertinença ben definida de 'Baix' i un valor discret de concentració d'oxigen dissolt, es pot calcular fàcilment el grau de certesa de la proposició.

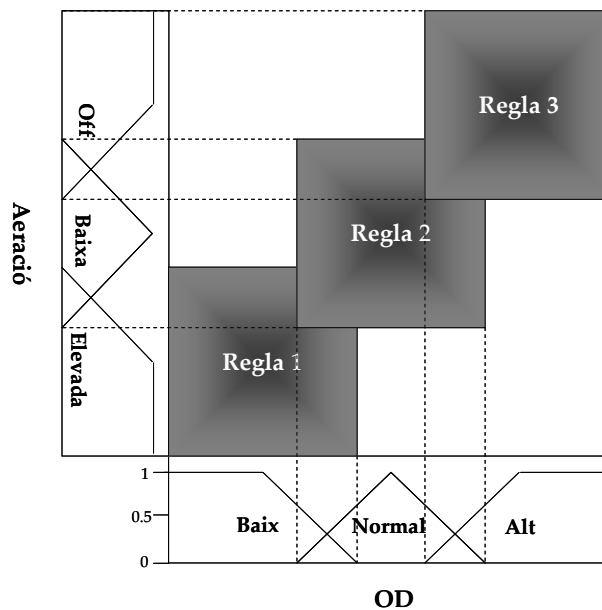


Figura 1.23. Superposició de les relacions difuses determinades per a la definició de les regles difuses (adaptat de Heske i Heske, 1999).

Mitjançant el procés anomenat **fuzzificació** es relaciona la variable d'entrada amb valor discret contra la proposició difusa en qüestió. La figura 1.24 mostra gràficament com treballa el procés de fuzzificació. Segons el gràfic d'aquesta figura, amb un valor de concentració d'oxigen dissolt de per exemple $2.65 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, la proposició 'l'Oxigen és alt' és certa amb un grau de 0.5 de certesa, la proposició 'l'Oxigen és normal' és certa amb un 0.2 mentre que la proposició 'l'Oxigen és baix' és certa amb un grau de zero, ja que el valor discret de $2.65 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ es troba fora del suport del conjunt difús 'Baix'.

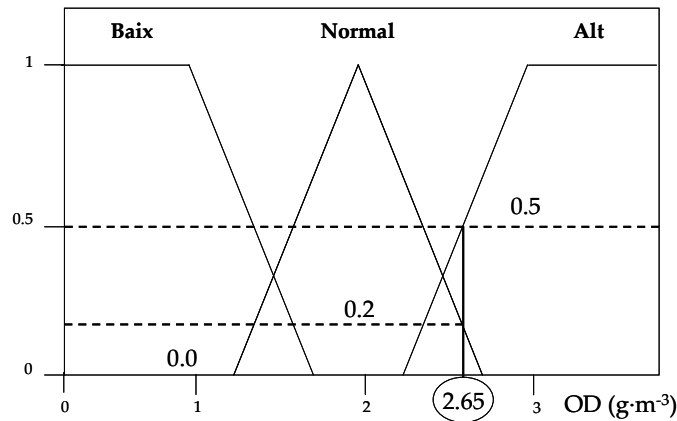


Figura 1.24. Fuzzificació de 2.65 g·m⁻³ d'OD en els conjunts difusos 'Baix', 'Normal' i 'Alt'.

La proposició difusa és un antecedent o un conseqüent segons la seva utilitat en el sistema difús. Si la proposició difusa es basa en variables difuses d'entrada, llavors s'anomena **antecedent**. Si la proposició difusa es basa en variables difuses de sortida, llavors s'anomena **conseqüent**. Per tant una regla del tipus 'Si-Llavors' relaciona antecedents i conseqüents de la següent manera:

SI antecedent LLAVORS conseqüent

Poden haver-hi més d'un antecedent i/o conseqüents en una mateixa regla 'Si-Llavors', quan això succeeix cal fer ús de connectors (I, O, o NO) per tal de fer les combinacions oportunes. Les combinacions d'antecedents d'una regla difusa se les anomenen premisses. Per exemple:

"SI antecedent 1 I antecedent 2 I ... LLAVORS conseqüent 1 O conseqüent 2"
"SI premissa LLAVORS conseqüència"

La conseqüència d'una regla és obtinguda quan es compleix la seva premissa. La **inferència** és l'acte d'obtenir una determinada conclusió a partir d'una premissa i almenys una regla.

Calcular el conjunt difús resultant que representa l'antecedent de la regla és el que es defineix com **composició**, és a dir, és la resolució de l'antecedent de la regla. Un cop s'ha realitzat la composició, cal traslladar aquests resultats a l'altre costat de la regla. L'operació mitjançant la qual es transfereix el resultat de la premissa en una regla 'Si-Llavors' al conseqüent s'anomena **implicació**. Un cop s'obté, mitjançant l'operació d'implicació, el conseqüent resultant per cadascuna de les regles que conformen la matriu de decisió o base de regles, cal realitzar un últim pas: agregar tots els conseqüents resultants. L'operació d'**agregació** es tradueix majoritàriament en l'operació d'unió dels conseqüents de cada regla de la base de regles.

La composició d'antecedents pot realitzar-se utilitzant T-normes per la conjunció I (intersecció), S-normes per la disjunció O (unió) o el complement difús NO per la negació. En canvi, generalment la implicació es realitza

mitjançant les T-normes i l'agregació es du a terme mitjançant les S-normes. Els dos mètodes d'inferència més utilitzats són el mètode d'inferència MIN-MAX de Mamdani i el PROD-SUM de Larsen. Mentre que el mètode de Mamdani (1975) utilitza el mínim per la implicació i el màxim per l'agregació, Larsen (1980) aposta pel producte per la implicació i la suma per l'agregació (encara que també existeix la variant amb l'ús del màxim com a agregació).

El controlador difús introduït per Mamdani i Assilian l'any 1975 utilitzava el que és va conèixer com a mètode MIN-MAX. Es va escollir l'operador MIN per la conjunció en la premissa de la regla així com també per la funció d'implicació i l'operador MAX per l'agregació. Encara que, en principi, es podria utilitzar qualsevol altre operador per la composició dels antecedents de la premissa d'una regla, en la literatura es troba normalment l'operador MIN en combinació amb el mètode MIN-MAX. La figura 1.25 presenta un esquema del procés de composició d'antecedents amb l'operador I (utilitzant el mínim de Zadeh) i del procés d'inferència difusa segons el mètode MIN-MAX, mínim per la implicació i màxim per l'agregació.

Fent un breu resum, en aquest apartat s'ha explicat com un valor discret d'una variable d'entrada és introduït al sistema difús (mitjançant la fuzzificació) de manera que es generen els conjunts difusos conseqüents per cada regla aplicable dins del conjunt difús gràcies al procés d'implicació. A continuació, el procés d'agregació suma tots els conjunts difusos produïts per regles individuals i s'obté una regió difusa que indica l'efecte global de totes les regles que prenen part en una acció. Per tal d'obtenir un valor discret de sortida, només falta un últim procés: la **defuzzificació**, mitjançant el qual, es calcula la variable de sortida discreta de l'espai difús agregat que s'ha obtingut.

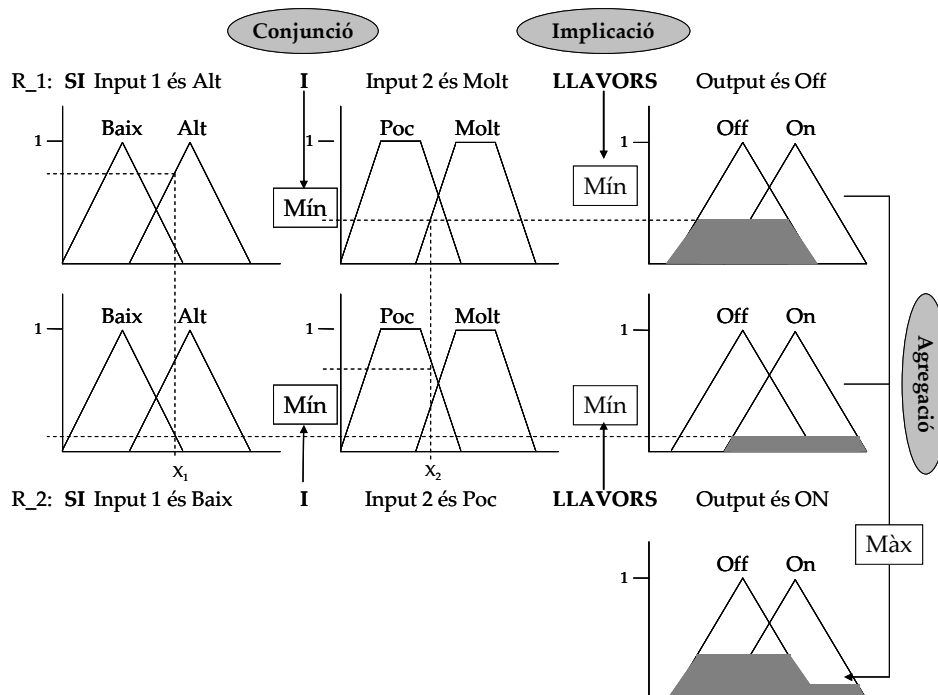


Figura 1.25. Esquema del funcionament del mètode MIN-MAX de Mamdani.

I.2.4.10. Defuzzificació.

L'acció de defuzzificar el conjunt difús de sortida resultant de l'agregació, proporciona un valor de sortida discret, és a dir, una acció discreta. La defuzzificació és l'últim pas amb el qual es passa de treballar amb valors lingüístics a tractar amb valors numèrics discrets. L'objectiu d'aquest últim procés és trobar el valor discret que millor representi la totalitat del conjunt difús de sortida obtingut. Cal tenir en compte que lògicament, un número discret no pot representar de manera exacta la complexitat de l'espai de sortida difús. És per això que, per exemple, Driankov (1993) afirma que no existeix un "mètode de defuzzificació ideal". No obstant, a la pràctica, la pèrdua d'informació no restringeix la utilitat de l'aplicació de la lògica difusa. Hi ha diferents mètodes de defuzzificació, els més comunament utilitzats actualment són la família dels màxims i el centroide.

Família dels màxims

Els diferents mètodes de defuzzificació que pertanyen a la família dels màxims presenten una característica en comú: tots presten atenció als punts que tenen el valor de certesa més gran en l'espai difús (àrea difusa resultant) de la sortida. El valor discret associat al valor màxim de certesa es converteix en el valor discret de sortida del sistema difús. Ara bé, existeixen varis mètodes per obtenir aquest valor discret: escollir qualsevol dels màxims de l'àrea difusa, escollir el menor dels màxims, el major dels màxims o la mitjana dels màxims.

Tal i com es troba representat en la figura 1.26, el menor dels màxims és el punt que es troba més a l'esquerra dels màxims, el major dels màxims és el que es troba més a la dreta i el màxim compost o mitjana dels màxims és el punt mig entre els punts de l'esquerra i de la dreta.

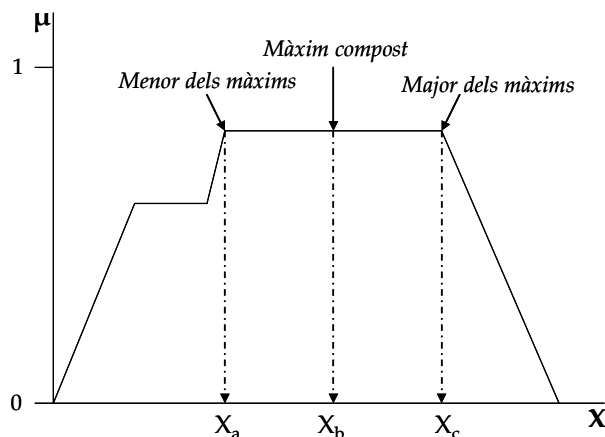


Figura 1.26. Exemple de mètodes de defuzzificació de la família de màxims: (X_a) Menor dels màxims, (X_b) màxim compost i (X_c) major dels màxims.

Centroide (Centre de gravetat o d'àrea)

El mètode del centroide, també anomenat centre de gravetat o d'àrea, és el que s'utilitza amb més freqüència en el disseny de controladors difusos (Passino i Yurkovich, 1998; Cox, 1999; Heske i Heske, 1999). També se l'anomena

centre de masses o de moments. Aquest mètode troba el 'punt de balanç' de la regió difusa resultant, mitjançant el càlcul de l'equació 1.15, on els límits d'integració són el rang de la variable de sortida X.

$$X_c = \frac{\int x\mu(x)dx}{\int \mu(x)} \quad (1.15)$$

On: X_c és el valor del centroide
 x és el valor de la variable X
 $\mu(x)$ és el grau de pertinença de x

A la figura 1.27, s'observa com el centroide troba un punt que representa el centre de gravetat del conjunt difús resultant de l'agregació.

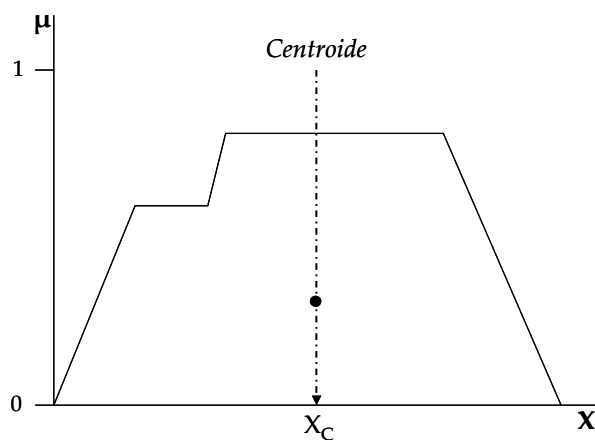


Figura 1.27. Exemple del mètode centroide pel procés de defuzzificació.

Quan les entrades al sistema varien, defuzzificar mitjançant el mètode centroide proporciona transicions de la sortida suaus des d'una regió a la següent. Com que normalment es tendeix a aconseguir aquestes transicions suaus, especialment en aplicacions de control de sistemes, sumat a la facilitat de càlcul respecte a altres mètodes, la defuzzificació per centroide és àmpliament aplicada (Cox, 1999; Heske i Heske, 1999; Ross, 2004).

I.2.5. Sistema de control basat en lògica difusa.

Un cop resumits els fonaments teòrics de la lògica difusa, a continuació s'explica en què consisteix i com funciona un sistema de control basat en lògica difusa (SCLD).

Generalment els SCLD es classifiquen en dues categories segons el tipus de regles difuses que utilitzen:

- Regles Mamdani: la primera vegada que es té constància de l'ús d'aquestes regles és quan s'escriguren les primeres aplicacions de control difús (Mamdani i Assilian, 1975). Aquestes regles es basen en que tant els antecedents com els conseqüents d'una regla difusa són conjunt difusos.
- Regles Sugeno: aquest altre tipus de regles va ser introduït per Takagi i Sugeno (1983), basades en que els conseqüents no són conjunts difusos sinó funcions lineals de les entrades del controlador.

Generalment, un SCLD (figura 1.28) es basa en el monitoratge d'uns valors de referència del sistema a controlar. Aquests valors s'obtenen a través de sensors o d'observacions manuals.

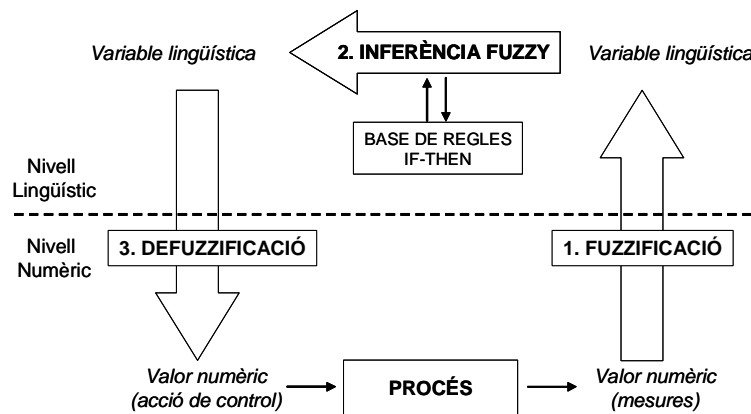


Figura 1.28. Estructura d'un SCLD

L'estructura d'un SCLD consisteix en dos nivells: numèric i lingüístic. Mentre el procés ha de treballar amb valors discrets, el control difús treballa amb variables lingüístiques. Per fer-ho possible, és necessari que els valors discrets de mesures del procés siguin traduïts a termes qualitius (per exemple: 'Baix', 'Alt', 'Molt Alt'...) amb un cert grau de pertinença de manera que s'obtinguin els valors difusos mitjançant el procés de fuzzificació. En un segon pas, amb interacció amb els experts que coneixen el procés a controlar s'obté la base de regles que permet determinar el tipus d'actuació en funció de les condicions d'entrada. Mitjançant la inferència, s'obté l'àrea difusa de sortida. Finalment, aquesta regió difusa de sortida es tradueix a l'acció concreta (nivell numèric) mitjançant la defuzzificació.

I.3. LA Lògica DIFUSA EN EL MÓN DEL TRACTAMENT BIOLÒGIC D'AIGÜES RESIDUALS.

I.3.1. L'ús de la lògica difusa per controlar processos biològics

Actualment, un sistema de control que està tenint resultats molt positius en el control de sistemes fortament no lineals, d'una manera senzilla, és el control basat en lògica difusa que, com s'ha explicat en apartats previs, té com objectiu tractar matemàticament el coneixement d'experts acostumats a fer un control manual del procés. La LD proporciona una solució pràctica pel control de sistemes complexos o poc definits com és el tractament biològic de les aigües residuals, ja que ofereix un marc rigorós per resoldre numèricament problemes de controlabilitat, aprofitant el coneixement d'experts en el funcionament del procés sense la necessitat d'utilitzar models matemàtics complexos.

Si el comportament intern d'un procés no pot ser expressat per lleis físiques en forma d'equacions i funcions, o bé ens trobem davant de processos poc definits com pot ser el procés d'assecatge, reaccions químiques especials o

processos biològics (figura 1.29), l'ús de regles del tipus 'Si-Llavors' poden ser útils per poder definir qualitativament aquests tipus de processos amb diferents nivells d'imprecisió.

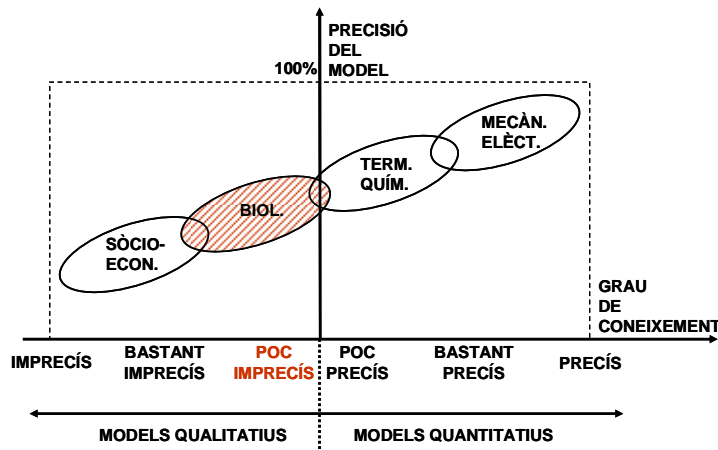


Figura 1.29. Precisió que s'aconsegueix del model segons el grau de coneixement qualitatiu o quantitatiu del procés (Issermann, 1998)

Com es mostra en la figura 1.29, pels processos mecànics i elèctrics es poden obtenir models quantitius precisos i amb menys precisió per processos tèrmics i químics. En referència als processos biològics es poden obtenir models qualitatius amb poca imprecisió i amb bastant o molta imprecisió es modelen els processos socioeconòmics. Ara bé, la precisió del model també depèn de la dimensió d'un procés. Amb l'augment de les dimensions, en general, l'exactitud del model disminueix (figura 1.30). Si la dimensió d'un procés és elevada i el seu coneixement és bàsicament qualitatiu, el model del procés en qüestió serà complex amb una precisió baixa.

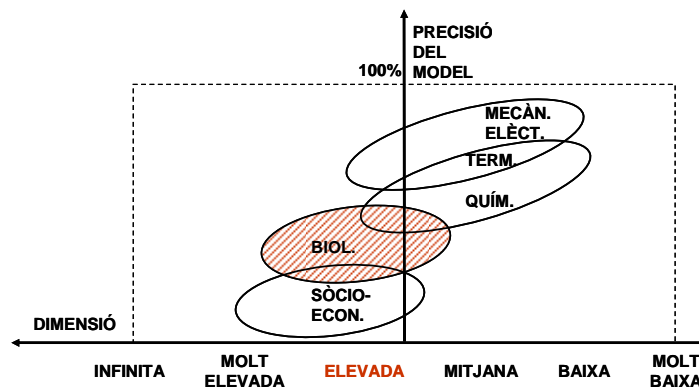


Figura 1.30. Precisió que s'aconsegueix del model pels diferents processos segons el grau dimensió dels seus elements (Issermann, 1998)

Com s'observa en les figures 1.29 i 1.30, els processos biològics es caracteritzen per ser models qualitatius amb poca precisió que fan necessari l'ús de coneixement heurístic mitjançant regles del tipus Si-Llavors. Per tant, el SCLD és especialment vàlid per processos amb dificultat per entendre el seu comportament, quan només és possible el coneixement qualitatiu i existeixen propietats fortament no lineals. Un d'aquests processos és el tractament biològic d'aigües residuals (Issermann, 1998).

A més a més, en els últims anys, en control de bioprocessos s'ha vist com els algoritmes clàssics estan essent substituïts per tècniques basades en intel·ligència artificial i sistemes experts. Aquestes tècniques han irromput amb força en la controlabilitat dels processos de tractament d'aigües residuals. Avanços recents en l'enginyeria de control suggereixen que les estratègies híbrides de control, integrant algunes idees i paradigmes existents amb diferents tècniques informàtiques, com per exemple la lògica difusa, algoritmes genètics i xarxes neuronals, podrien proporcionar millores en el control de la qualitat de l'efluent (Chen, 2001a).

I.3.2. Antecedents: ús de la lògica difusa en el món del tractament d'aigües residuals

La taula 1.6 resumeix una selecció d'articles de revistes científiques que fan referència a l'aplicació de la lògica difusa al tractament d'aigües dels últims 15 anys. Aquesta taula s'ha dividit en sis grans apartats segons el tipus d'estudi realitzat:

1. Estudis de simulació.
2. Estudis de simulació i amb planta pilot
3. Estudis amb planta pilot
4. Estudis amb planta pilot i EDAR real
5. Estudis amb EDAR real
6. Estudis d'anàlisi de cost

En primer lloc s'han agrupat aquelles referències que presenten estudis de simulació. A continuació es recullen aquells estudis en que a més de les simulacions, s'han realitzat experiments a nivell de laboratori, amb plantes pilot. El tercer grup d'articles tenen en comú l'ús de plantes pilots en els estudis que es presenten i el següent apartat (amb només un article), a més de l'estudi amb planta pilot, inclou la seva implementació a planta real. El penúltim grup fa referència als estudis realitzats amb EDAR reals mentre que en l'últim lloc, es presenten uns estudis sobre anàlisi de cost.

El resum dels articles s'ha realitzat seguint quatre eixos bàsics: origen de les aigües residuals que es tracten, tipus de procés i tractament amb el qual es treballa (ja sigui per simulació, en el laboratori o en instal·lacions reals) i com s'ha aplicat la lògica difusa en el món de les aigües residuals.

Origen de les aigües residuals:

- Origen urbà (Urb.). Són aigües de tipus domèstic.
- Origen industrial (Ind.). Majoritàriament són aigües provinents de la indústria alimentària (amb elevades càrregues orgàniques).

Tipus de procés:

- Processos biològics:
 - Biomassa en suspensió: fangs activats (F. Act.).

- Biomassa fixada (Bio. Fix.): aquest tipus de procés coincideix sempre, en aquest recull d'articles que es presenta, amb tractaments anaeròbics de l'aigua residual.
- Processos fisicoquímics (F-Q): s'inclouen els processos químics, com per exemple la neutralització del pH, i els processos fisicoquímics pròpiament dits, com per exemple, l'addició de clorur fèrric per precipitar fosfats.

Tipus de tractament:

- Eliminació biològica de matèria orgànica (EBMO).
- Eliminació biològica de nitrogen (EBNi).
- Eliminació biològica del fòsfor (EBP).
- Eliminació biològica de nutrients (nitrogen i fòsfor) (EBN).
- Neutralització pH (N_pH).

Aplicacions de la lògica difusa:

- Controladors basats en lògica difusa:
 - Control difús: estructura convencional d'un controlador basat en lògica difusa (entrades – base de regles – sortides). En alguns casos es dissenya el control difús emulant les estructures clàssiques P, PI o PID.
 - Control predictiu difús, que en alguns articles utilitza també un model basat en lògica difusa o bé un de basat en xarxes neuronals.
 - Control supervisor (o jeràrquic) difús, que pot presentar:
 - Els llaços de control de tots els nivells basats en lògica difusa
 - Només el llaç de control de nivell superior basat en lògica difusa
 - Control híbrid difús: la base de regles del control difús es defineix mitjançant altres tècniques de 'soft computing': 'rough sets', algorismes genètics i xarxes neuronals.
 - Control anticipat difús: s'utilitza la lògica difusa en la diagnosi i en el llaç de control.
- Diagnòs basades en lògica difusa (detecció i identificació de falles), com per exemple reconeixement de patrons.
- Sistema expert difús: diagnòs i supervisió mitjançant lògica difusa.
- Observadors difusos: estimadors de paràmetres del procés basats en lògica difusa.
- Modelització difusa: modelització de processos basada en lògica difusa i a vegades complementada amb l'ús de les xarxes neuronals.
- Regressió difusa: anàlisi de regressió mitjançant mètodes de regressió lineal difús o de 'derived fuzzy goal regression' per l'estimació de costos.

En el cas que la lògica difusa hagi estat utilitzada per construir / dissenyar estructures de control, els llaços de control resumits en el recull de bibliografia són:

- Dosificació font de carboni externa (Dosif. C)

- Retorns de la línia de fangs (Retorns)
- Aeració (Aer.)
- Dosificació clorur fèrric (Dosif. FeCl₃)
- Neutralització aigües residuals (Neutral.)
- Pertorbacions a l'afluent (Pert. Af.)
- Control recirculació de fangs (R.Ext)
- Control de la purga (Purg.)
- Control recirculació interna (R.Int)

Taula 1.6. Resum bibliogràfic de l'aplicació de la lògica difusa en el món del tractament d'aigües residuals

REFERÈNCIES	AIGÜES RESIDUALS	TIPUS DE PROCÉS	TIPUS DE TRACTAMENT	APLICACIONS DE LA LòGICA DIFUSA (LD)	
				Tipus d'aplicacions	Llaços de control basats en LD
1. Estudis de SIMULACIÓ					
Andújar i Bravo, 2005	Ind.	F-Q	N-pH	Control Difús	Neutral.
Brdys i Díaz Maíquez, 2002	-	Fangs Act.	EBN	Control Predictiu Difús	Aer.
Cadet <i>et al.</i> , 2004	Urb.	Fangs Act.	EBNi	Control Supervisor Difús	Eliminació N
Chen <i>et al.</i> , 2003	Ind.	Fangs Act.	EBMO	Control Híbrid Difús	Eliminació MO
Du <i>et al.</i> , 1999	-	Fangs Act.	EBMO	Modelització Difusa	-
Fiter <i>et al.</i> , 2005b	Urb.	Fangs Act.	EBNi	Control Difús	Aer.
Galluzo <i>et al.</i> , 2001	-	Fangs Act.	EBN	Control Supervisor Difús	Aer.
Huang i Wang, 1999	Urb.	Fangs Act.	EBMO	Modelització Difusa	-
Kalker <i>et al.</i> , 1999	Urb.	Fangs Act.	EBNi	Control Supervisor Difús	Aer.
Marsilli-Libelli i Giunti, 2002	Urb.	Fangs Act.	EBNi	Control Predictiu Difús	Dosif. C.
Rodrigo <i>et al.</i> , 1999	-	Fangs Act.	EBMO	Control Difús (PID)	Aer.
Traore, 2003	Urb.	Fangs Act.	EBMO	Control Difús	Rec. Ext.
Yoo <i>et al.</i> , 2003	Ind.	Fangs Act.	EBMO	Modelització Difusa	-
2. Estudis de SIMULACIÓ i amb PLANTA PILOT					
Adroer <i>et al.</i> , 1999	Ind.	F-Q	N-pH	Control Difús	Neutral.
Estaben <i>et al.</i> , 1997	Ind.	Bio. Fix.	EBMO	Control Difús (PI)	Pert. Af.
Meyer i Pöpel, 2003	Urb.	Fangs Act.	EBNi	Control Supervisor Difús	Aer.

REFERÈNCIES	AIGÜES RESIDUALS	TIPUS DE PROCÉS	TIPUS DE TRACTAMENT	APLICACIONS DE LA LòGICA DIFUSA (LD)	
				Tipus d'aplicacions	Llaços de control basats en LD
Tay i Zhang, 2002	-	Bio. Fix.	EBMO	Modelització Difusa	-
Tsai <i>et al.</i> , 1993, 1994, 1996	Urb.	Fangs Act.	EBMO	Control Difús	R. Ext.
3. Estudis amb PLANTA PILOT					
Carrasco <i>et al.</i> , 2002	Ind.	Bio. Fix.	EBMO	Sistema Expert Difús	-
Carrasco <i>et al.</i> , 2004	Ind.	Bio. Fix.	EBMO	Diagnosi Difusa	-
Chang <i>et al.</i> , 1998	Urb.	Fangs Act.	EBP	Control Difús	R. Ext.
Ferrer <i>et al.</i> , 1998	Urb.	Fangs Act.	EBNi	Control Difús (PID)	Aer.
Genovesi <i>et al.</i> , 1999	Ind.	Bio. Fix.	EBMO	Diagnosi Difusa	-
Lardon <i>et al.</i> , 2004	Ind.	Bio. Fix.	EBMO	Diagnosi Difusa	-
Marsilli-Libelli i Müller, 1996	-	Bio. Fix.	EBMO	Control Difús	Pert.Af.
Menzl <i>et al.</i> , 1996	Ind.	Fangs Act.	N-pH	Control Difús	Neutral.
Müller <i>et al.</i> , 1997	Ind.	F. Act./Bio. Fix.	EBNi	Control Anticipat Difús	Pert. Af.
Murnleitner <i>et al.</i> , 2002	Ind.	Bio. Fix.	EBMO	Control Predictiu Difús	Pert. Af.
Peng <i>et al.</i> , 2002	Ind.	Fangs Act.	EBNi	Control Difús	Aer. / Dosif.C
Peng <i>et al.</i> , 2003	Ind.	Fangs Act.	EBNi	Control Difús	Aer.
Polit <i>et al.</i> , 2001	Ind.	Bio. Fix.	EBMO	Observadors Difusos	-
Puñal <i>et al.</i> , 2003	Ind.	Bio. Fix.	EBMO	Control Difús (PI)	Pert. Af.
Steyer <i>et al.</i> , 2001	Ind.	Bio. Fix.	EBMO	Diagnosi Difusa	-
Tomello <i>et al.</i> , 1999	Urb.	Fangs Act.	EBNi	Control Supervisor Difús	Aer./R.Int/R.Ext/Purg.
4. Estudis amb PLANTA PILOT i EDAR REAL					
Hamamoto <i>et al.</i> , 1997	Urb.	Fangs Act.	EBN	Control Difús	Aer.

REFERÈNCIES	AIGÜES RESIDUALS	TIPUS DE PROCÉS	TIPUS DE TRACTAMENT	APLICACIONS DE LA LòGICA DIFUSA (LD)	
				Tipus d'aplicacions	Llaços de control basats en LD
5. Estudis amb EDAR REALS					
Bongards, 2001	Urb.	Fangs Act.	EBNi	Control Predictiu Difús	Returns
Chen <i>et al.</i> , 2001b	Ind.	Fangs Act.	EBMO	Control Híbrid Difús	Eliminació MO
Fiter <i>et al.</i> , 2005a	Urb.	Fangs Act.	EBNi	Control Difús	Aer./Rec.Ext
Fiter <i>et al.</i> , 2005c	Urb.	Fangs Act.	EBNi	Control Difús	Aer
Manesis <i>et al.</i> , 1998	Urb.	Fangs Act.	EBNi	Control Difús	Aer./Rec.Int/Rec. Ext
Martínez <i>et al.</i> , 2005	Urb.	Fangs Act.	-	Sistema Expert	-
Rammacher i Hansen, 2000	Urb.	Fangs Act.	EBN	Control Difús	Dosif. FeCl ₃
6. Estudis d'ANÀLISI de Cost					
Chen i Chang, 2002	Urb./Ind.	-	-	Regressió Difusa	-
Wen i Lee, 1999	Urb.	-	-	Regressió Difusa	-

L'ús de la lògica difusa en el món real de les aigües residuals és un camp encara per explotar quan en altres sectors del món industrial fa molt de temps que tenen incorporada aquesta tecnologia. Es troben nombroses referències bibliogràfiques de la utilització d'aquesta tècnica d'intel·ligència artificial en diversos processos industrials, i en la societat actual, molta tecnologia està basada en la lògica difusa, des dels aparells d'aire condicionats al sensor de seguretat d'un ascensor.

En els últims anys, s'han començat a utilitzar les tècniques basades en lògica difusa com eines per la millora dels processos de tractament d'aigües residuals. En primer lloc la lògica difusa s'ha utilitzat com a eina per dissenyar llaços de control de tot tipus, tant de baix com d'alt nivell, de tipus adaptatius, predictius... Amb menys proporció, la lògica difusa també apareix com a eina per dissenyar sistemes experts, sistemes de diagnòs, estimadors de paràmetres...

Un nou aspecte que últimament està prenent força és la utilització de diverses tècniques d'intel·ligència artificial per obtenir sistemes de control híbrids on hi poden conviure tècniques com les xarxes neuronals, algoritmes genètics i altres, amb la lògica difusa.

Majoritàriament els SCLD es centren en fer les funcions dels llaços de controls típics del procés de tractament d'aigües residuals mitjançant la substitució dels controls convencionals (ON-OFF, PI, PID...). Per tant, en la bibliografia es troben nombroses referències de l'ús de SCLD per controlar l'aeració (fins i tot aeració intermitent), recirculació de fangs, dosificació d'una font de carboni per la desnitrificació, dosificació de clorur fèrric per l'eliminació química del fòsfor... En menys proporció es troba l'ús de la lògica difusa per controlar aspectes no tant normalitzats fins al moment, com per exemple: els retorns de la línia de fang (per evitar pics de càrrega del nitrogen), perturbacions de l'aigua residual d'entrada (xocs tòxics, pics de cabal i càrrega...), neutralització de les aigües residuals que han de ser abocades a llera o a EDAR, ...

Encara que ja es troba una bona quantitat de referències sobre l'ús de la lògica difusa en el món de les aigües residuals, encara són pocs els articles que parlen d'implementació real. La majoria són estudis de simulació o en planta pilot. Són contades les ocasions que es parla de la implementació real de la lògica difusa en el tractament de les aigües residuals. En el resum que es presenta en la taula 1.6, dels quaranta quatre articles seleccionats només set presenten la implementació real d'un sistema (ja sigui expert, de control, de diagnòs, etc) basat en lògica difusa.

OBJECTIUS



II. OBJECTIUS

Existeixen un gran nombre d'estudis de simulació i de laboratori que proven la utilitat dels sistemes de control basats en lògica difusa pels sistemes de fangs activats. Ara bé, són pocs els que han arribat a una validació en EDAR real. En base a aquest fet, s'establen els objectius de la present tesi.

L'objectiu principal és la implementació i avaluació de Sistemes de Control basats en Lògica Difusa (SCLD) per sistemes de fangs activats. Aquest objectiu general es concreta en l'estudi de dos SCLD, un per controlar la concentració de Sòlids en Suspensió a l'efluent (SCLD_SS) i un altre per controlar l'eliminació biològica del Nitrogen (SCLD_N). Per dur a terme aquesta tasca, es plantegen els següents objectius específics:

- Estudi de les EDAR reals on s'implementaran els SCLD, l'EDAR Granollers i l'EDAR Taradell. Aquest estudi inclou la descripció de les instal·lacions; la caracterització de l'aigua d'entrada; conèixer el nivell d'instrumentació, monitoratge i operació del procés; i caracteritzar el seu funcionament segons els rendiments d'eliminació que s'assoleixen.
- Disseny dels SCLD, que inclou la selecció i definició de les variables, el desenvolupament de les diferents matrius de decisió i elecció dels mètodes de composició, inferència i defuzzificació.
- Avaluació i comparació, mitjançant estudis de simulació, de les diferents matrius de decisió obtingudes en la fase de disseny dels SCLD.
- Implementació en EDAR real dels SCLD, amb el desenvolupament dels programes de control i les corresponents interfícies d'usuari.
- Validació dels SCLD implementats mitjançant el seguiment, l'avaluació i l'anàlisi dels resultats obtinguts en les EDAR reals.

L'objectiu final d'aquesta tesi consisteix en obtenir una eina de control simple, fiable i útil per l'equip tècnic de les EDAR estudiades, per tal de millorar-ne la seva operació, així com també la possibilitat d'extrapolar l'experiència obtinguda en aquesta tesi per futures aplicacions.

MATERIALS I MÈTODES



III. MATERIALS I MÈTODES

En el primer apartat d'aquest capítol es descriu la metodologia general en què es basa el disseny i implementació dels SCLD que es desenvolupen en la present tesi. En el següent apartat es descriuen els programes informàtics (GPS-X™ i MATLAB®) emprats per dur a terme els estudis de simulació. A continuació, s'explica en detall un protocol estàndard, anomenat protocol Benchmark, sobre el que s'ha basat el procediment de simulació i avaluació dels SCLD. Per acabar, es resumeix la instrumentació i les eines de programació utilitzades per la implementació dels SCLD a les respectives EDAR.

III.1. METODOLOGIA DE DISSENY I IMPLEMENTACIÓ D'UN SISTEMA DE CONTROL BASAT EN LÒGICA DIFUSA.

El disseny i implementació d'un Sistema de Control basat en Lògica Difusa (SCLD) pot dividir-se en vuit passos, tal i com es presenta a continuació:

1. Descripció del procés a controlar.
2. Identificació i selecció de les variables del SCLD.
3. Especificació de l'univers de discurs de cada variable.
4. Desenvolupament del SCLD
 - 4.1 Elecció de les funcions de pertinença que defineixen cada variable.
 - 4.2 Construcció de les regles 'Si-Llavors'
 - 4.3 Selecció d'operadors
 - a. Composició dels antecedents (I, O, NO)
 - b. Tipus d'inferència (MIN-MAX, PROD-SUM)
 - 4.4 Elecció del mètode de defuzzificació.
5. Simulació i avaluació del SCLD.
6. Desenvolupament del SCLD en un programa informàtic.
7. Integració del programa en una aplicació d'usuari.
8. Validació del SCLD implementat en la realitat.

El primer pas és conèixer el procés a controlar, és a dir, conèixer la relació de les variables que el defineixen. És important escollir adequadament les variables d'entrada i sortida que s'inclouran en el SCLD. Determinades les variables, cal definir l'univers de discurs de cadascuna d'elles, és a dir, el rang de valors que tindrà en compte el sistema de control. Aquesta selecció no té perquè ser fixa i òptima en el primer disseny, ja que un cop implementat el SCLD, es poden canviar els límits dels rangs en funció de les condicions específiques i variables del procés.

A continuació, s'han d'escollir les funcions de pertinença que defineixen cada variable i en conseqüència determinar els següents paràmetres:

- a. Número de funcions de pertinença: definir les funcions de pertinença significa assignar etiquetes lingüístiques per a cada variable. Aquest és un pas clau, on és molt important introduir el coneixement expert a l'hora de definir les variables d'entrada i sortida del SCLD en les diferents funcions de pertinença. Normalment la majoria de variables acaben per ser definides entre dos i set funcions de pertinença (Heske i Heske, 1999). Decidir el nombre de funcions a utilitzar pot ser dut a terme en base només al coneixement o bé fer ús de mètodes automàtics. Els mètodes automàtics per generar les funcions de pertinença depenen de les dades que siguin disponibles del sistema a controlar, més que de l'experiència humana. Els mètodes més prometedors inclouen tècniques de xarxes neuronals i algoritmes genètics. En la present tesi però, s'optà per l'ús del coneixement expert ja que l'obtenció del volum mínim de dades necessàries per utilitzar tècniques de partició automàtica no era fàcil d'aconseguir, ja fos per manca d'instrumentació i monitoratge d'alguna de les variables o per històrics incomplets.
- b. Forma de les funcions de pertinença: en aplicacions de control, predominen les representacions triangulars i trapezoïdals com a funcions de pertinença. En l'apartat I.2.4.7 es resumeixen les formes que poden adoptar aquestes funcions.
- c. Simetria de les funcions de pertinença: la simetria d'una funció de pertinença fa referència a la forma d'aquesta funció respecte els seus punts de màxima certesa. Encara que és més habitual treballar amb funcions simètriques, és possible treballar amb funcions asimètriques que tenen les seves vessants amb inclinació diferent.
- d. Partició de l'univers de discurs: la situació i la densitat, de les funcions de pertinença al llarg de l'univers de discurs influencia fortament el grau de control que es pot aconseguir en cada regió. La regla general postula que quant més gran sigui el nombre de funcions de pertinença utilitzades, més fi haurà de ser el control. Lògicament, de la mateixa manera que varia el número de funcions de pertinença, també varia el nombre de regles que poden definir-se en la matriu de decisió. Quantes més funcions de pertinença hi hagi en una àrea, més regles de control hi podran haver, fent més sensible el controlador a qualsevol modificació.
- e. Solapament de les funcions de pertinença: el solapament entre dues funcions fa referència al grau de certesa en el qual es creuen dues funcions adjacents. En l'exemple de la figura 3.1, el solapament entre les funcions 'Baix' i 'Normal' és del 0.5 mentre que el solapament entre les funcions 'Normal' i 'Alt' és del 0.33.

Si les funcions de pertinença no es solapen, el sistema de control es redueix a un sistema booleà. Un solapament excessiu pot causar inestabilitat degut al gran número de regles canviants que actuen sobre la variable de sortida. Petits solapaments provoquen que el SCLD tingui fortes qualitats booleanes i grans solapaments (però no excessius) proporcionen tolerància a sorolls o ambigüitats de les entrades. A continuació s'enumeren les normes que segueixen la majoria d'aplicacions (Heske i Heske, 1999):

- Cada punt de l'univers de discurs ha de pertànyer com a mínim a un conjunt difús.

- La majoria de punts en l'univers de discurs haurien de ser membres de dos conjunts difusos.
- On es solapen les funcions de pertinença, la suma del grau de pertinença per tots els conjunts difusos hauria d'estar entre 0.5 i 1.
- En casos especials, regions petites de l'univers de discurs poden ser membres com a màxim de tres conjunts difusos.

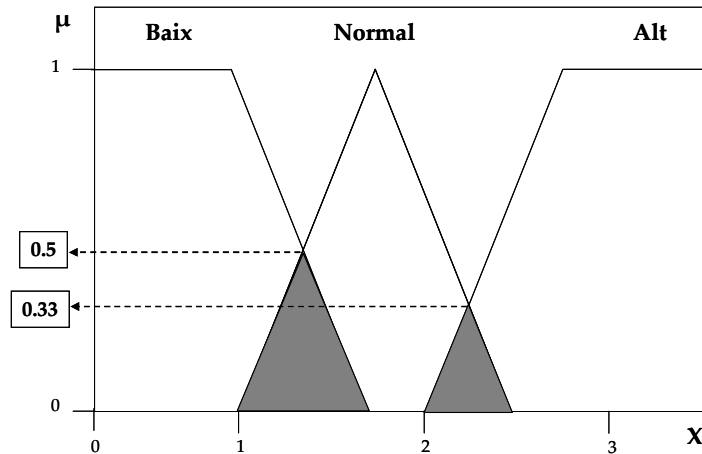


Figura 3.1. Exemple de solapament entre dues funcions de pertinença. En aquest cas el solapament és del 0.5 entre 'Baix' i 'Normal' i del 0.33 entre 'Normal' i 'Alt'.

Definides completament les variables difuses es procedeix a dissenyar la base de regles, o també anomenada matriu de decisió, del SCLD. En la definició de les regles 'Si-Llavors' és on s'introdueix el coneixement del procés en el sistema de control. Les regles capturen les relacions entre les variables d'entrada i de sortida difuses. Aquest tipus de regles, poden emular fàcilment comportaments de sistemes complexos i relacions no lineals. A l'igual que en la definició de les funcions de pertinença, la construcció de la matriu de decisió pot ser basada en el coneixement expert o bé mitjançant l'aplicació de tècniques automàtiques de generació de regles basada en xarxes neuronals i/o algorismes genètics.

En la present tesi es consideren sempre regles de tipus Mamdani (1974), per tant els SCLD que s'hi desenvolupen contenen conjunts difusos tant en la premissa com en la conseqüència de les regles 'Si-Llavors'.

Un cop definida la matriu de decisió cal escollir els operadors lògics difusos (explicats detalladament en l'apartat I.2.4.8 i I.2.4.9) per la composició (connectors) dels antecedents i la inferència, i per acabar, s'ha de determinar el mètode de defuzzificació (explicats a l'apartat I.2.4.10). En els dos SCLD desenvolupats en aquesta tesi, la composició dels antecedents és duta a terme pel connector 'T' utilitzant el mínim de Zadeh mentre que la inferència és realitzada pel mètode MIN-MAX (Mamdani i Assilian, 1975) (mínim per la implicació i màxim per l'agregació). Per la defuzzificació s'utilitza el mètode centroide. L'elecció d'aquests mètodes recau en què són els més comunament utilitzats en el camp dels SCLD (Patyra, 1996; Ross, 2004).

La simulació i avaluació dels SCLD que es presenten en aquesta tesi s'ha dut a terme mitjançant els programaris GPS-X™ (Hydromantis, 2003a) i MATLAB®. El desenvolupament del SCLD en un programa informàtic s'ha realitzat de manera diferent pels dos SCLD. En el cas del SCLD_SS es va programar amb codi Java, utilitzant una llibreria anomenada NCR FuzzyJ Toolkit i en l'altre cas, el SCLD_N es va programar amb codi PascalObject (Borland® Delphi®), utilitzant a més la Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB (Mathworks, 2002).

És molt important la integració del programa en una aplicació d'usuari que sigui fàcil de manipular i comprendre. Per la present tesi, s'han dissenyat dues aplicacions per a l'usuari, una basada en llenguatge JAVA pel SCLD_SS i una altra en llenguatge Delphi pel SCLD_N. Obtenir aplicacions fàcils d'entendre i de manipular facilita la implicació del personal a l'hora d'utilitzar el SCLD, d'operar amb ell i modificar-lo segons el seu criteri.

III.2. PROGRAMES INFORMÀTICS PER ESTUDIS DE SIMULACIÓ

A continuació es descriuen els dos programes informàtics que es van utilitzar per avaluar els SCLD durant la seva etapa de disseny.

III.2.1. GPS-X (General Purpose Simulator – X)

GPS-X (Hydromantis, 2003a) és un entorn de modelització per la simulació d'EDAR. Aquest programa és una plataforma de simulació que permet treballar amb diferents configuracions i processos de les EDAR. A més, utilitza una interfície gràfica avançada per l'usuari que facilita la modelització i simulació dinàmica.

En la figura 3.2 és presenta una captura de pantalla d'aquest programa, on es pot observar la interfície amb la que treballa l'usuari a la vegada que es mostra la construcció d'un diagrama de procés de línia d'aigües d'una EDAR, consistent en l'aigua d'entrada (afluent), el dessorrador, el decantador primari circular, el tanc de mescla completa com a reactor biològic, el decantador secundari circular, el filtre de sorra com a tractament terciari i finalment l'aigua de sortida (efluent).

Aquesta eina de simulació permet examinar, d'una manera interactiva i dinàmica, les relacions que es produeixen entre diverses unitats del procés de l'EDAR modelitzada. Per dur a terme un bon disseny, operació i control de les EDAR, és fonamental conèixer i comprendre aquestes relacions.

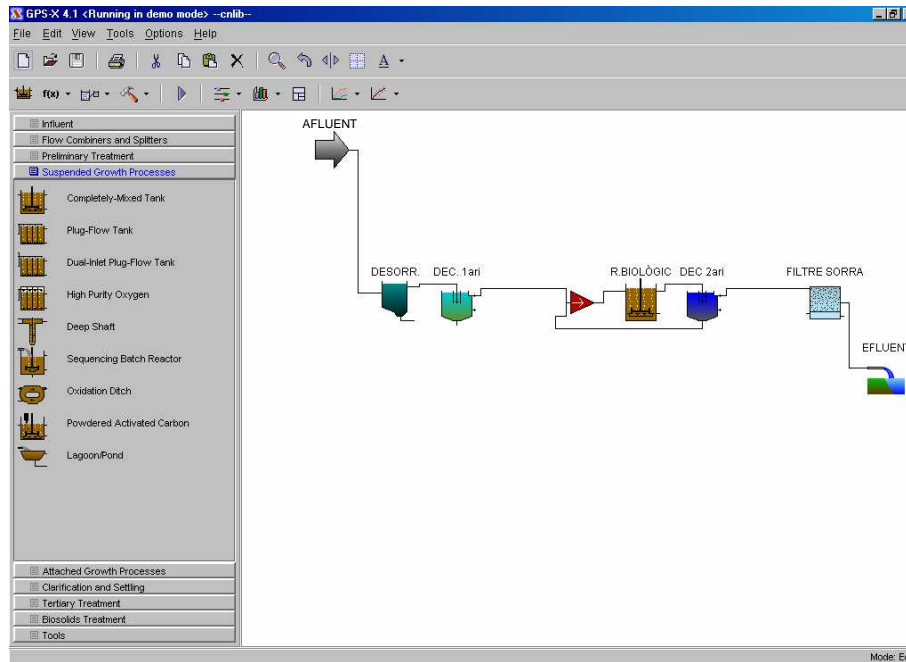


Figura 3.2. Exemple de la interfície gràfica per l'usuari del programa GPS-X.

GPS-X consisteix en un conjunt de mòduls de programes i biblioteques de models. Una biblioteca és una metodologia utilitzada com una base per agrupar models compatibles, que utilitzen variables similars, (Hydromantis, 2003b). La taula 3.1 enumera els diferents mòduls i biblioteques que presenta el GPS-X.

Taula 3.1. Llistat dels mòduls i biblioteques que presenta el programa GPS-X.

Mòduls disponibles	Biblioteques	
Simulador	CNLIB	Carboni – Nitrogen
Constructor	CNIPLIB	Carboni – Nitrogen Industrial
Analitzador	CNPLIB	Carboni – Nitrogen – Fòsfor
Optimitzador	CNPIPLIB	Carboni – Nitrogen –Fòsfor Industrial
Estimador de paràmetres dinàmic	CN2LIB	Carboni – Nitrogen avançat
Control Avançat	CN2IPLIB	Carboni – Nitrogen avançat Industrial

GPS-X funciona amb un llenguatge senzill, en ACSL, basat en icones gràfiques que permet una millor comprensió del procés dinàmic a simular. Per això, presenta una sèrie d'objectes (unitats) que permeten a l'usuari dibuixar el procés de l'EDAR que es vol modelitzar i simular. Cadascun dels objectes porta associat el model matemàtic que defineix el procés que es produeix en aquella unitat i els següents paràmetres: configuració hidràulica (corrents d'entrada i sortida), característiques físiques, característiques operacionals, variables de seguiment, etiquetes de cadascun dels corrents que entren i surten de l'objecte i font (si l'origen de les dades provenen d'una altra unitat). En la taula 3.2 s'enumeren els tipus d'objectes amb que es pot modelar una EDAR amb el GPS-X. L'afluent pot ser definit de diferents maneres segons el model que s'esculli. La taula 3.3 presenta els diferents models que pot seguir la unitat d'afluent del GPS-X.

Taula 3.2. Llistat dels objectes disponibles per modelar una EDAR en el programa de simulació GPS-X.

Unitats de procés	
Afluent	En continu / discontinu
Combinadors / Separadors de corrents	Doble entrada, triple sortida, ...diferents combinacions
Pre-tractament	Estació bombeig, tanc equalitzador, dessorrador.
Biomassa en suspensió	Tanc de mescla completa, tanc de flux pistó, SBR, carrousel d'oxidació, llacunatge,...
Biomassa fixada	Biofiltre airejat, filtre percolador, reactor híbrid,...
Decantació	Decantadors primaris / secundaris, circulars / rectangulars
Tractament terciari	Filtres de sorra, filtres de membrana, desinfecció.
Tractament Biosòlids	Flotació, espessidor, digestió aeròbica / anaeròbica, deshidratació.
Eines	Efluent, caixa negra, caixa d'eines amb múltiples opcions (temporitzadors, filtrat de dades, controladors on-off, PID, control anticipat, mostrejador,...)

Taula 3.3. Configuracions de l'afluent disponibles en el programa de simulació GPS-X.

Configuracions de l'afluent	
BODbased	Model basat en la DBO. Model estequiomètric basat en fraccions. Dades d'entrada: DBO ₅ SST, NKT i coeficients estequiomètrics.
CODbased	Model basat en la DQO. Model estequiomètric basat en fraccions. Dades d'entrada: DQO, SST, NKT i coeficients estequiomètrics.
CODfractions	Model basat en fraccions de la DQO. Dades d'entrada: DQO, NKT i coeficients estequiomètrics.
States	Afluent definit amb les variables bàsiques, components comuns en models de tractament d'aigües residuals (p.ex. substrat particulat, substrat soluble, amoni,...)
Sludge	Entrada de fang activat pre-configurat per modelitzar corrents de biosòlids.
Acetat	Dosificació química suplementària pel tractament biològic.
Methanol	Dosificació química suplementària pel tractament biològic
Water	Entrada d'aigua neta per emular càrregues hidràuliques (p.ex. pluges)

A la taula 3.4 es presenten els models biològics disponibles en totes les unitats de biomassa en suspensió i biomassa fixada que presenta el GPS-X.

Taula 3.4. Models biològics disponibles en el programa de simulació GPS-X.

Models biològics	
ASM1	Model estàndard per la transformació i eliminació del C (carboni) i N (nitrogen)
ASM2d	Model que inclou l'eliminació del C, N i P (fòsfor)
ASM3	Aquest és el model més nou del model C i N de la IWA Task Group.
MANTIS	Versió d' <i>Hydromantis Inc.</i> del ASM1 en la qual es contempla una modificació per descriure acuradament la desnitrificació aeròbica
TwostepMANTIS	Variació del model MANTIS, amb dos passos de nitrificació (nitritació i nitratació)
New General	ASM1 ampliat a l'eliminació biològica del P (model Dold, 1997)
Prefermenter	Model per la generació d'AGV per processos d'EBP.

Respecte als models de sedimentació, el GPS-X utilitza el model doble exponencial de Vesilind i Tackács a la vegada que proporciona la possibilitat de treballar amb models biològicament actius o no reactius.

III.2.2. MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox)

MATLAB® és un llenguatge computacional i un entorn interactiu pel desenvolupament d'algorismes, visualització de dades, anàlisi de dades i càlcul numèric. MATLAB es pot utilitzar en un ampli ventall d'aplicacions, entre les quals es troba el disseny de sistemes de control.

MATLAB és un producte de la companyia Mathworks. Aquesta corporació ofereix també 20 eines d'aplicació específica que es construeixen sobre les capacitats computacionals i gràfiques de MATLAB. Una d'aquestes eines és la 'Fuzzy Logic Toolbox' (FLT), emprada per resoldre problemes amb lògica difusa. FLT és una eina que proporciona un entorn informàtic que permet crear i editar sistemes d'inferència difusa manualment, amb eines gràfiques interactives o amb funcions de la línia de comandes o mitjançant la seva generació automàtica amb tècniques neuro-adaptatives o 'clustering' difús.

A continuació s'anomenen les característiques principals de la FLT (Mathworks, 2004):

- Interfície gràfica per l'usuari especialitzada per a construir sistemes d'inferència difusa (Fuzzy Inference Systems (FIS)) i veure i analitzar els resultats (figures 3.3 i 3.4).

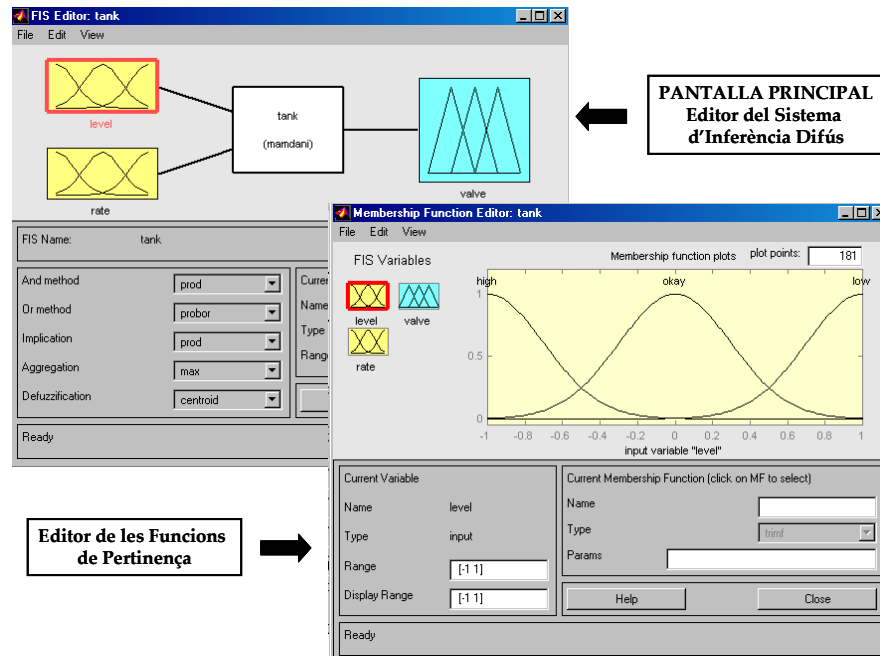


Figura 3.3. Interfície gràfica de la FLT. Exemple de la pantalla principal i de l'editor de les funcions de pertinença.

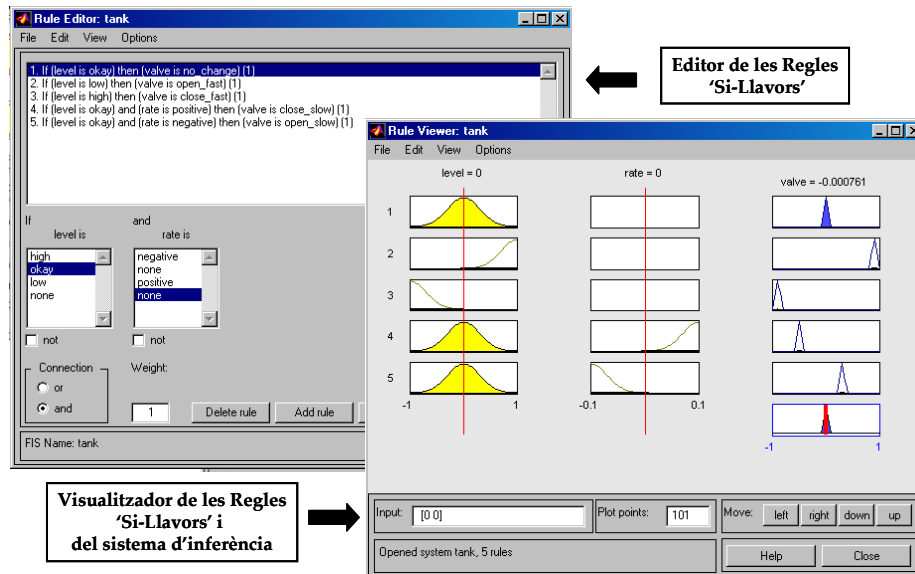


Figura 3.4. Exemple de les pantalles d'edició i visualització de les regles difuses de la FLT.

- Definició de funcions de pertinença per crear sistemes d'inferència difusa.
- Suport pels operadors lògics I, O i NO en la definició de les regles difuses per l'usuari.
- Facilitat per incloure un sistema d'inferència difusa en un model de Simulink.
- Habilitat per generar codi C que pot ser utilitzat per altres software o per a que els motors d'inferència difusos siguin executables independentment.

III.2.3. Connexió MATLAB – GPS-X

Una manera d'estudiar el funcionament dels SCLD en el procés de tractament d'aigües residuals és mitjançant l'ús de les dues eines informàtiques descrites en els dos punts anteriors, tal i com es mostra en la figura 3.5. El programa de simulació GPS-X pot comunicar-se amb el programa de càlcul MATLAB (i per tant amb l'eina FLT) en les dues direccions, de manera que amb l'eina FLT de MATLAB es dissenya el SCLD a la vegada que s'executa per actuar sobre el procés de l'EDAR modelitzada amb el GPS-X.

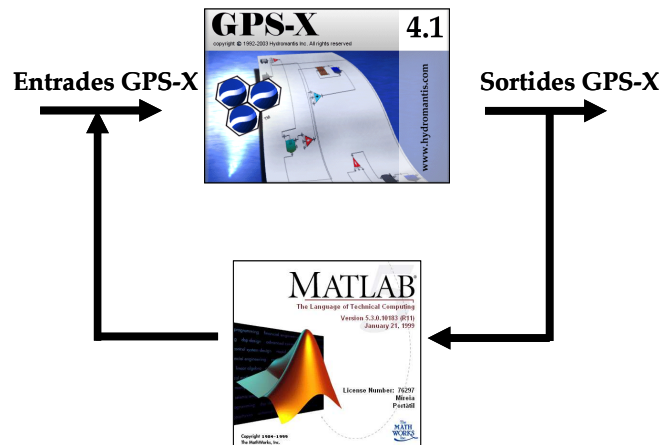


Figura 3.5. MATLAB en el llaç de simulació del GPS-X (Hydromantis, 2003c).

Aquesta connexió permet a l'usuari cridar el codi MATLAB des d'un model del GPS-X enviant variables d'aquest model com a entrades a una funció especial M-file de MATLAB i situant les sortides d'aquesta funció a les altres variables del procés modelitzat amb el GPS-X. El llaç, presentat en la figura 3.5, fa possible utilitzar la connexió de MATLAB per controlar un model en el GPS-X utilitzant un controlador que està implementat en MATLAB, com pot ser per exemple, els SCLD que s'expliquen en la present tesi. En l'annex 1 es presenten els fitxers necessaris per dur a terme aquesta connexió MATLAB↔GPS-X, per la simulació dels dos SCLD que s'expliquen en aquesta tesi. Per a cadascun d'ells es necessita un fitxer tipus text (extensió .mtl) on s'especifiquen les variables que entren i surten de MATLAB, i un segon fitxer M-file (extensió .m) on es detalla l'execució del SCLD.

III.3. PROTOCOL BENCHMARK

Sempre que s'avaluen diferents estratègies de control per a plantes de tractament d'aigües residuals, és important fer estudis amb models matemàtics mitjançant simulacions per poder predir quin seria el comportament real del sistema d'estudi. No obstant, les estratègies de control són normalment avaluades per diferents configuracions d'EDAR i sota diferents condicions d'operació. Amb la voluntat de desenvolupar una eina que permetés comparar diferents estratègies de control d'una manera estàndard, el primer *'Task group on Respirometry-Based Control of the Activated Sludge Process'* de la International Water Association (IWA) (Spanjers *et al.*, 1998) va crear un primer protocol de simulació Benchmark. Més endavant, aquest Benchmark original va ser modificat per la *'European Co-operation'* en el camp de la recerca tècnica i científica (COST) accions 682/624 en cooperació amb el segon *'IWA Respirometry Task Group'* (Copp, 2000; Alex *et al.*, 1999 i Pons *et al.*, 1999) amb l'objectiu de proporcionar un protocol estàndard de simulació consistent.

El Benchmark és un entorn de simulació de plataforma independent que proporciona un procediment de simulació i avaluació estandarditzada que inclou la configuració 'tipus' d'una EDAR, models de simulació i paràmetres de model, una descripció detallada de les pertorbacions que són aplicades durant l'avaluació i criteris d'avaluació per valorar la relativa efectivitat de les estratègies simulades.

III.3.1. Configuració de la planta Benchmark

La configuració de la planta Benchmark, esquematitzada en la figura 3.6, presenta les següents característiques (Copp, 2002):

- 5 reactors biològics en sèrie amb un decantador secundari.
- Volum útil de 5999 m³ (el tancs 1 i 2 tenen 1000 m³ i el 3, 4 i 5, 1333 m³)
- Els tancs 1 i 2 no estan airejats, però es troben completament agitats.
- Els tancs 3, 4 i 5 estan airejats i es pot arribar a una K_{La} màxima de 10 hr⁻¹.
- El valor per defecte de K_{La} en el tancs 3 i 4 és de 10 hr⁻¹ i en el 5 de 3.5 hr⁻¹.
- La concentració d'oxigen a la saturació és de 8 g O₂·m⁻³
- Decantador secundari amb un volum de 6000 m³ (amb una àrea de 1500 m² i 4 m de fondària) subdividit en 10 capes.

- El punt d'alimentació al decantador secundari és a 2.2 m (al mig de la sisena capa).
- Dues recirculacions internes:
 - Recirculació de nitrats del 5è al 1er reactor.
 - Recirculació externa del decantador secundari a entrada de biològic.
- La purga es de forma continuada des del decantador secundari

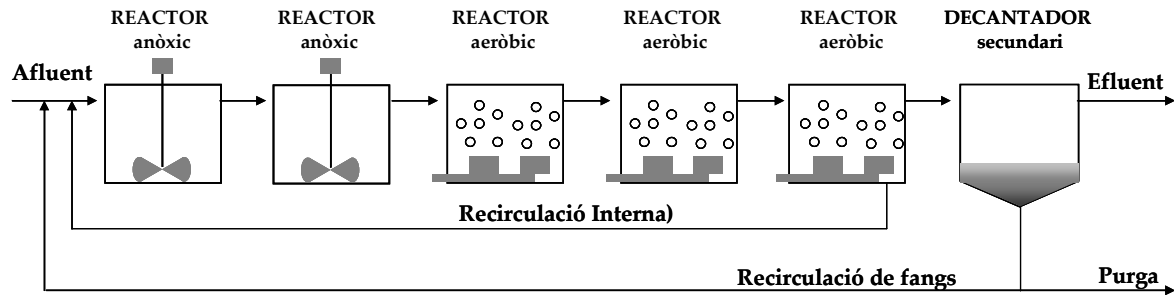


Figura 3.6. Representació esquemàtica de la configuració de la planta Benchmark.

III.3.2. Models del procés

El model de procés biològic utilitzat pels reactor és el model número 1 (ASM1) de la IWA (Henze *et al.*, 1987) mentre que per representar el procés de sedimentació del decantador secundari, es va escollir la funció doble exponencial de velocitat de sedimentació de Takács *et al.* (1991)

III.3.2.1. Model del procés biològic

Existeixen nombrosos models que interpreten el procés d'eliminació biològica de les aigües residuals, però el més utilitzat i el que generalment s'accepta com a estàndard en el camp de la modelització biològica de fangs activats és el ASM1. Aquest model va ser proposat pel grup de modelització matemàtica de la IWA i ha servit de base pel desenvolupament posterior de nous models com el ASM2, ASM2d i el més recent ASM3, que actualment encara no han estat plenament acceptats per la comunitat internacional (Copp, 2002). A pesar que l'ASM1 presenta limitacions, el seu ús generalitzat el fa, encara avui en dia, el model més utilitzat.

En la taula 3.6 es troba la representació de l'ASM1 en forma de matriu de Petersen. L'ASM1 descriu l'eliminació de matèria orgànica i de nitrogen (nitrificació i desnitrificació) a partir de 8 processos i 13 components o variables d'estat. Aquests components es troben detallats a la taula 3.5, amb el seus símbols i unitats.

Taula 3.5. Variables d'estat de l'ASM1

Símbol	Descripció variable d'estat	Unitats
S_I	Compostos solubles inerts: matèria orgànica soluble que no pot degradar-se biològicament i que, per tant, no intervé en el procés biològic.	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$
S_S	Substrat ràpidament biodegradable: matèria orgànica que els microorganismes utilitzen directament pel seu creixement (tant en condicions anòxiques com aeròbiques)	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$
X_I	Matèria particulada inert: matèria orgànica en suspensió que no intervé en el procés de degradació biològica	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$
X_S	Substrat lentament biodegradable: substrat que es degrada biològicament després de passar per un procés d'hidròlisi, que el deixa disponible pels microorganismes	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$
$X_{B,H}$	Biomassa heterotròfica activa: biomassa amb capacitat de transformar la matèria orgànica a diòxid de carboni en presència d'O ₂ . En condicions anòxiques (sense O ₂ ni nitrats) és la responsable de la desnitrificació.	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$
$X_{B,A}$	Biomassa autotròfica activa (biomassa nitrificant): biomassa responsable de la nitrificació.	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$
X_P	Compostos particulats resultants de la mort de la biomassa: durant el procés de mort de tot tipus de biomassa es produeix una part de matèria orgànica particulada que no es pot degradar biològicament	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$
S_O	Oxigen dissolt: és l'oxigen molecular en forma dissolta present a l'aigua.	$g \text{ O}_2 \cdot m^{-3}$
S_{NO}	Nitrogen oxidat: nitrats i nitrats provinents de l'afluent o de la biomassa nitrificant.	$g \text{ N} \cdot m^{-3}$
S_{NH}	Nitrogen amoniacal: amoni present en l'aigua residual.	$g \text{ N} \cdot m^{-3}$
S_{ND}	Nitrogen orgànic soluble: correspon a les formes de nitrogen soluble que es converteixen en amoni pel procés d'amonificació.	$g \text{ N} \cdot m^{-3}$
X_{ND}	Nitrogen orgànic particulat: aquest component necessita el procés d'hidròlisi per convertir-se en S_{ND} abans de ser amonificat	$g \text{ N} \cdot m^{-3}$
S_{ALK}	Alcalinitat: durant la nitrificació es produeix un consum d'alcalinitat que provoca una baixada del pH de l'aigua. L'alcalinitat permet conèixer la possibilitat d'inhibició de la biomassa autotròfica.	$mol \cdot l^{-1}$

Bàsicament, l'ASM1 contempla quatre processos principals:

- Creixement de la biomassa.
- Mort de la biomassa
- Amonificació del nitrogen orgànic
- Hidròlisi del nitrogen orgànic particulat.

En funció de la presència o absència d'oxigen dissolt aquests quatre processos principals es subdivideixen en els vuit processos representats en la matriu de la taula 3.6.

1. Creixement aerobi de la biomassa heterotròfica.
2. Creixement anòxic de la biomassa heterotròfica (desnitrificació).
3. Creixement aerobi de la biomassa autotròfica (nitrificació).
4. Mort de la biomassa heterotròfica.
5. Mort de la biomassa autotròfica.
6. Amonificació del nitrogen orgànic soluble.
7. Hidròlisi dels compostos orgànics.
8. Hidròlisi del nitrogen orgànic.

Taula 3.6. Matriu de Petersen de l'ASM1 (Henze *et al.*, 1987).

Components Procés (j)	S _I	S _s	X _I	X _s	X _{B,H}	X _{B,A}	X _P	S _O	S _{NO}	S _{NH}	S _{ND}	X _{ND}	S _{ALK}	Velocitat de reacció (r _j)
1. Creixement aerobi heterotròfics		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		-i _{XB}			$-\frac{i_{XB}}{14}$	$\mu_{mH} \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) X_{B,H}$
2. Creixement anòxic heterotròfics		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{2.86Y_H}$		-i _{XB}			$-\frac{1-Y_H}{14 * 2.86Y_H} - \frac{i_{XB}}{14}$	$\mu_{mH} \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) * \eta_g X_{B,H}$
3. Creixement aerobi dels autotròfics						1		$-\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$			$-\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7Y_A}$	$\mu_{mA} \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) X_{B,A}$
4. Mort dels heterotròfics				1-f _p	-1		f _p							b _H · X _{B,H}
5. Mort dels autotròfics				1-f _p		-1	f _p							b _A · X _{BA}
6. Amonificació										1	-1		$\frac{1}{14}$	k _a S _{ND} X _{BH}
7. Hidròlisi components orgànics		1		-1										$k_H \frac{X_S / X_{B,H}}{K_X + X_S / X_{B,H}}$ $\left[\left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{B,H}$
8. Hidròlisi del nitrogen orgànic											1	-1		r ₇ (X _{ND} /X _s)
Matèria orgànica soluble inert (g DQO·m ⁻³)														
Substrat fàcilment biodegradable (gDQO·m ⁻³)														
Matèria orgànica particulada inert (g DQO·m ⁻³)														
Substrat lentament biodegradable (g DQO·m ⁻³)														
Biomassa heterotròfica activa (g DQO·m ⁻³)														
Biomassa autotròfica activa (g DQO·m ⁻³)														
Partícules no biodegradables de la mort de la biomassa (g DQO·m ⁻³)														
Oxigen [DQO negativa] (g DQO·m ⁻³)														
Nitrogen nitrat i nitrit (g N·m ⁻³)														
Nitrogen NH ₄ ⁺ i NH ₃ (g N·m ⁻³)														
Nitrogen orgànic soluble biodegradable (g N·m ⁻³)														
Nitrogen orgànic particulat biodegradable (g N·m ⁻³)														
Alcalinitat														

A partir de la matriu definida per l'ASM1 de la taula 3.6 es pot conèixer el balanç de matèria de cadascuna de les variables d'estat considerades al model. Per exemple, l'oxigen dissolt (S_o) és consumit pel pas de substrat soluble fàcilment biodegradable (S_s) a biomassa heterotròfica ($X_{B,H}$) alhora que també és consumit pel creixement dels autòtrofs ($X_{B,A}$). D'altra banda, el substrat particulat lentament degradable (X_s) desapareix a l'hidrolitzar-se en forma de matèria orgànica fàcilment degradable (S_s) i n'apareix de la mort dels microorganismes, tan autòtrofs com heteròtrofs (X_P). El substrat soluble fàcilment biodegradable (S_s) s'obté llavors de la hidròlisi ja esmentada i és consumit per a l'obtenció d'energia per a la síntesi cel·lular dels heteròtrofs, tan en condicions aeròbiques com anòxiques. Per la seva part, el nitrogen orgànic soluble biodegradable (S_{ND}) s'obté de la hidròlisi del nitrogen orgànic particulat (X_{ND}), provinent de la mort dels microorganismes, i és convertit en amoni (S_{NH}) pel procés d'amonificació. Una part d'aquest amoni s'utilitza per al creixement dels heteròtrofs com a font de nitrogen i la resta per a l'obtenció d'energia pel creixement dels autòtrofs en el procés de nitrificació. Els nitrats (S_{NO}) són produïts per la síntesi cel·lular dels autòtrofs i són eliminats del sistema pel procés de desnitrificació. Així, les variables $X_{B,H}$ i $X_{B,A}$, que representen les dues poblacions de microorganismes, augmenten durant el procés de creixement i disminueixen durant el procés de mort. Finalment, cal destacar que una petita part provinent de la mort dels microorganismes (X_P) no és considerada com a matèria orgànica lentament biodegradable i, per tant, potencialment es degrada ràpidament. D'altra banda, l'alcalinitat (S_{ALK}) augmenta amb l'amonificació i la desnitrificació, però disminueix amb l'oxidació del substrat orgànic i la nitrificació.

Així doncs, el model considera que els heteròtrofs consumeixen la matèria orgànica per a obtenir energia i que aquesta es pot obtenir tant en condicions aeròbiques com anòxiques; gràcies a la hidròlisi de la matèria orgànica lentament biodegradable i a l'oxidació directa de la matèria orgànica soluble fàcilment degradable. L'energia obtinguda s'utilitza pel procés de síntesi cel·lular, on es consumeix part de la matèria orgànica fàcilment biodegradable i nitrogen present al medi. Alhora, en el model el procés de mort dels heteròtrofs fa que s'alliberi al medi substrat lentament degradable, nitrogen orgànic i materials inerts. A més, el model considera que els autòtrofs obtenen l'energia per a la síntesi cel·lular mitjançant la transformació de l'amoni a nitrit i a nitrat, i que el cicle de regeneració i mort dels heteròtrofs està fortament interrelacionat amb els processos de mort d'aquests microorganismes autotròfics.

La representació matricial de l'ASM1 de la taula 3.6 mostra també les relacions estequiomètriques que associen les variables d'estat amb les velocitats de reacció dels processos. Utilitzant aquesta representació, es poden identificar fàcilment els diversos paràmetres involucrats en el model. Els paràmetres estequiomètrics i cinètics del model per una temperatura de 15°C, utilitzats pel model Benchmark es presenten en les taules 3.7 i 3.8.

Taula 3.7. Valors dels paràmetres estequiomètrics per l'ASM1 en el model Benchmark

Símbol	Descripció del paràmetre	Valor	Unitats
Y_A	Rendiment autotròfic	0.24	$gX_{B,A} \text{ DQO format (g N utilitzat)}^{-1}$
Y_B	Rendiment heterotròfic	0.67	$gX_{B,H} \text{ DQO format (g N utilitzat)}^{-1}$
f_p	Fracció de biomassa als productes particulats	0.08	Adimensional
i_{XB}	Fracció de nitrogen en la biomassa	0.08	$g \text{ N (g DQO)}^{-1}$ en la biomassa ($X_{B,A}$ i $X_{B,H}$)
i_{XP}	Fracció de nitrogen en productes particulats	0.06	$g \text{ N (g DQO)}^{-1}$ en X_P

Taula 3.8. Valors dels paràmetres cinètics per l'ASM1 en el model Benchmark

Símbol	Descripció del paràmetre	Valor	Unitats
μ_{mH}	Velocitat de creixement màxima heterotròfics	4.0	d^{-1}
K_S	Constant saturació (creixement heterotròfics)	10.0	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$
K_{OH}	Constant saturació (oxigen heterotròfics)	0.2	$g \text{ O}_2 \cdot m^{-3}$
K_{NO}	Constant saturació (nitrats)	0.5	$g \text{ N}_{NO_3} \cdot m^{-3}$
b_B	Velocitat de mort heterotròfics	0.3	d^{-1}
η_g	Factor de correcció velocitat creixement anòxic	0.8	Adimensional
η_h	Factor de correcció velocitat hidròlisi anòxica	0.8	Adimensional
K_h	Velocitat màxima específica hidròlisi	3.0	$g X_S (g X_{B,H} \text{ DQO} \cdot d)^{-1}$
K_X	Constant saturació (hidròlisi)	0.1	$g X_S (g X_{B,H} \text{ DQO})^{-1}$
μ_{mA}	Velocitat de creixement màxima autotròfics	0.5	d^{-1}
K_{NH}	Constant saturació (creixement autotròfics)	1.0	$g \text{ N}_{NH_3} \cdot m^{-3}$
b_A	Velocitat mort autotròfics	0.05	d^{-1}
K_{OA}	Constant saturació (oxigen autotròfics)	0.4	$g \text{ O}_2 \cdot m^{-3}$
k_a	Velocitat amonificació	0.05	$m^3 (gDQO \cdot d)^{-1}$

La determinació dels paràmetres cinètics i estequiomètrics que es presenten en les taules 3.7 i 3.8 es van dur a terme per assegurar que l'aplicació del model en els estudis de simulació Benchmark fos consistent.

III.3.2.2. Model de decantació

De la mateixa manera que la selecció del model biològic, a l'hora d'escollir el model de decantació per la planta Benchmark, l'acceptació internacional d'aquest era un factor clau. La funció de velocitat de sedimentació doble exponencial de Tackács *et al.* (1991) està basat en el concepte de la Teoria del flux de sòlids (Patty *et al.*, 1992; Paraskevas *et al.*, 1993; Ottherphol i Freund, 1992; Koehne *et al.*, 1995). Aquesta teoria parteix de considerar el decantador com una superposició de capes longitudinals del mateix gruix (figura 3.7). A cada capa s'efectua un balanç de matèria suposant els següents criteris:

- els sòlids que entren a cada capa es reparteixen uniformement per tota l'àrea de pas.
- només es considera un flux vertical de sòlids.

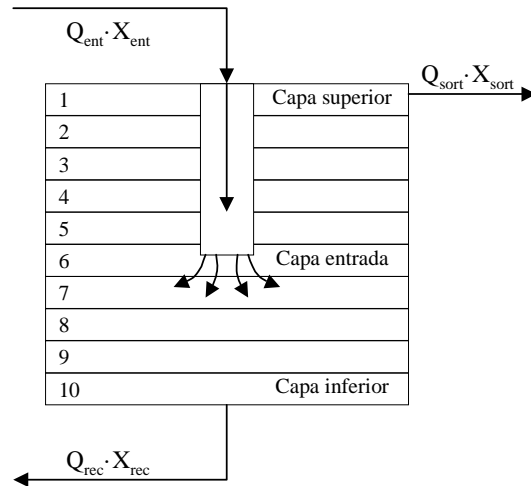


Figura 3.7. Diagrama de capes teòriques dins un decantador, on Q_{ent} és el cabal d'entrada, X_{ent} és la concentració de sòlids d'entrada, Q_{rec} és el cabal de recirculació, X_{rec} és la concentració de sòlids de recirculació, Q_{sort} és el cabal de sortida i X_{sort} és la concentració de sòlids de sortida (Colprim, 1998).

A cada capa es produeixen dos fenòmens diferents: el moviment de l'aigua que es desplaça (J_{fi}) i el fenomen de sedimentació degut a la força de la gravetat (J_{si}).

A la figura 3.8 es presenta la direcció i el valor dels fluxos de matèria deguts al dos fenòmens proposats, diferenciant les capes situades per sobre i per sota del corrent de decantació, on:

- J_{fi} és el flux de sòlids degut al moviment d'aigua, en $Kg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$
- J_{si} és el flux de sòlids degut a la força de la gravetat, en $Kg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$
- V_i és el volum de la capa i , en m^3
- V_j és el volum de la capa j , en m^3
- A és l'àrea de pas entre les capes, en m^2
- X_i és la concentració de sòlids en la capa i , en $Kg \cdot m^{-3}$
- X_j és la concentració de sòlids en la capa j , en $Kg \cdot m^{-3}$
- t és el temps, en dies

Els fluxos de sòlids $J_{s,i}$ i $J_{s,j}$ sempre tenen una direcció descendent tal i com s'observa a l'esquema de la figura 3.8. El flux d'aigua pot ser ascendent o descendent en funció de la posició de la capa. Així, per a les capes situades per sobre de l'alimentació la direcció és ascendent i per les de la zona de compactació o inferior, descendent.

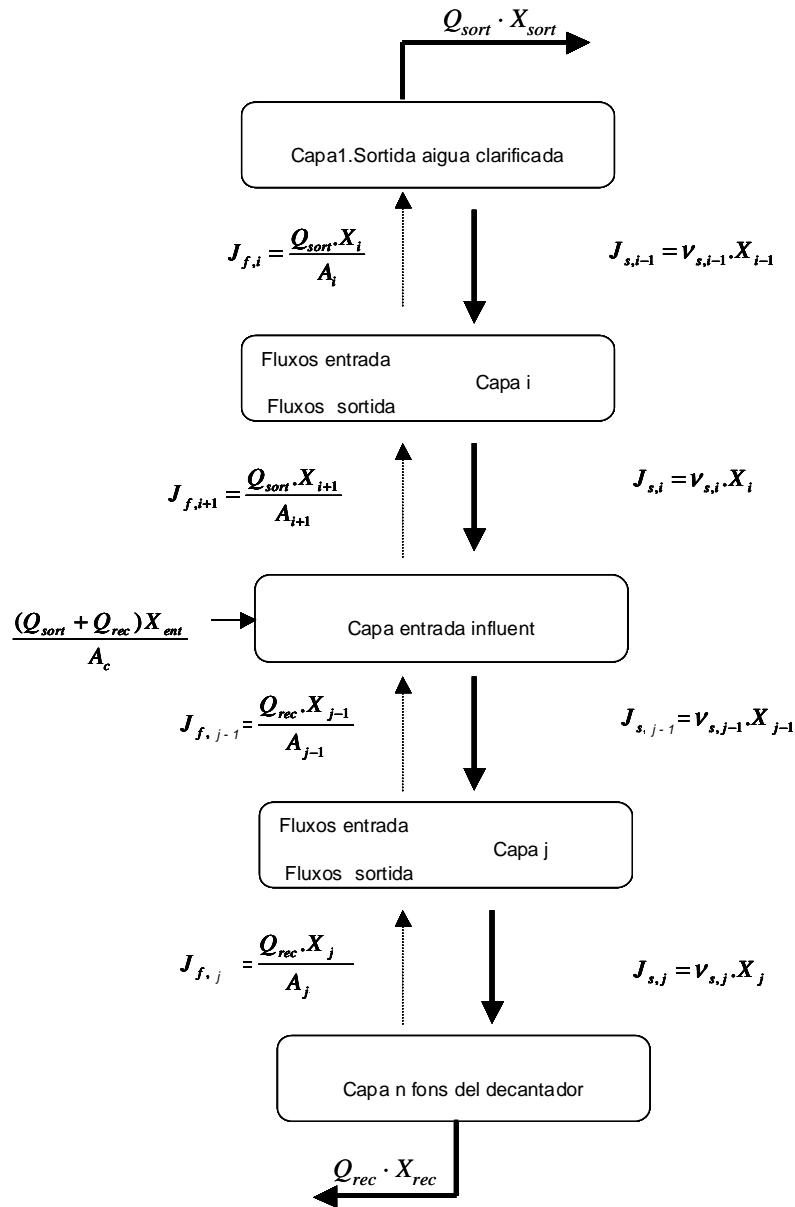


Figura 3.8. Fluxos de sòlids entre les capes d'un decantador.

El balanç de sòlids per sobre de la capa d'alimentació és doncs:

$$(J_{f,i} + J_{s,i}) - (J_{f,i+1} + J_{s,i-1}) + \frac{V_i}{A_i} \frac{dX_i}{dt} = 0 \quad (3.1)$$

i per sota de la capa d'alimentació:

$$(J_{f,i} + J_{s,i}) - (J_{f,i-1} + J_{s,i-1}) + \frac{V_i}{A_i} \frac{dX_i}{dt} = 0 \quad (3.2)$$

El flux de sòlids de cadascuna de les capes del decantador depèn de la concentració de sòlids de la capa X_i així com de la seva velocitat de sedimentació $v_{s,i}$ ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$), segons la següent equació 3.3.

$$v_{s,i} = v_0 e^{-rhin X_i^0} - v_o e^{-rflo \cdot X_i^0} \tag{3.3}$$

$$0 \leq v_{s,i} \leq v_o'$$

- On:
- $v_{s,i}$ és la velocitat de sedimentació de la capa i , $m \cdot d^{-1}$
 - v_o és la velocitat màxima de sedimentació, $m \cdot d^{-1}$
 - $rhin$ paràmetre de sedimentació en la zona de compactació, $m^3 \cdot g^{-1}$
 - $rflo$ paràmetre de sedimentació de la zona floculant, $m^3 \cdot g^{-1}$
 - $X_i^0 = X_i - X_{min}$ on X_{min} és la concentració mínima de sòlids que es pot assolir i X_i la concentració de sòlids de la capa i

La concentració mínima de sòlids que es pot assolir es calcula com una fracció (paràmetre del model) de la concentració del sòlids del corrent d'entrada ($X_{min} = fns \cdot X_{ent}$) a partir del valor de la màxima concentració de sòlids no sedimentables.

Si es representa l'equació 3.3, tal i com es mostra en la figura 3.9, es poden diferenciar quatre zones. La velocitat màxima de sedimentació s'obté per la concentració de sòlids X^0 definida en l'equació 3.4:

$$X_{i,max}^0 = \frac{1}{rhin - rflo} \ln \left[\frac{rhin}{rflo} \right] \tag{3.4}$$

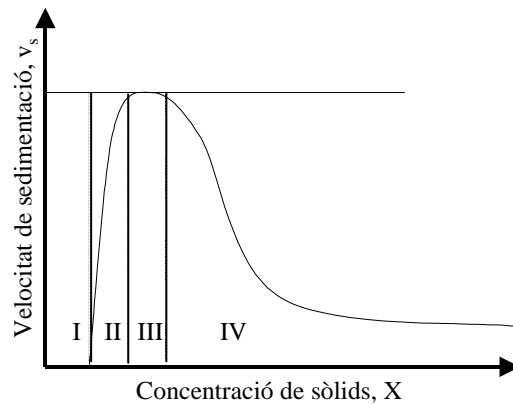


Figura 3.9. Representació del model de la velocitat de sedimentació.

Zona I. La velocitat de sedimentació val zero ja que la concentració de sòlids és igual o inferior a la concentració mínima de sortida de l'aigua clarificada.

Zona II. Les partícules de sòlids van creixent per fenòmens de floculació, dominats pel paràmetre $rflo$ de l'equació 3.3.

Zona III. Les partícules de sòlids han assolit la seva mida màxima i per tant la velocitat de sedimentació es manté aproximadament constant.

Zona IV. Apareixen fenòmens de compactació de forma que domina el paràmetre $rhin$ de l'equació 3.3.

A l'igual que en el model biològic, en la funció de velocitat de sedimentació de l'equació 3.3 s'utilitzen una sèrie de paràmetres que han d'estar completament definits en la descripció de la planta Benchmark. A la taula 3.9 s'enumeren aquests paràmetres, a la vegada que es presenta el seu símbol associat i les unitats corresponents.

Taula 3.9. Paràmetres del model de decantació i valors per defecte.

Símbol	Descripció del paràmetre	Valor	Unitats
v'_o	Velocitat màxima de sedimentació	250	$m \cdot d^{-1}$
v_o	Velocitat màxima de sedimentació Vesilind	474	$m \cdot d^{-1}$
ρ_{in}	Paràmetre de sedimentació en la zona de compactació	0.000576	$m^3(gSS)^{-1}$
ρ_{flo}	Paràmetre de sedimentació en la zona de floculació	0.00286	$m^3(gSS)^{-1}$
f_{ns}	Fracció no sedimentable	0.00228	Adimensional

III.3.3. Composició de l'aigua d'entrada

Cadascun dels arxius que formen l'afluent contenen 28 dies amb dades introduïdes cada 15 minuts. Les variables incloses en aquests arxius són S_s , X_{BH} , X_s , X_i , S_{NH} , S_i , S_{ND} , X_{ND} i Q_{en} ; mentre que les variables S_o , X_{BA} , X_p i S_{NO} s'assumeix que son zero. El component d'alcalinitat ve donat per defecte i el seu valor és de $7 \text{ mols} \cdot \text{m}^{-3}$ durant el període de 28 dies. Aquests arxius presenten tres situacions o escenaris; una primera de normalitat que correspon a un període de temps sec i dues de pertorbació: període de tempesta i pluja. L'arxiu on les condicions són de temps sec, les variacions de cabal i DQO segons el moment del dia són considerades dins la normalitat. El segon arxiu és una variació del primer, però amb la incorporació de dos episodis de tempesta. Això comporta un augment del material particulat (tant inert com biodegradable) resultat del rentat dels col·lectors. El tercer dels arxius representa un període de pluja. En aquest cas no s'arriba al nivell d'increment de cabal ni material particulat del casos anterior, però el període es més llarg.

La taula 3.10 presenta les mitjanes ponderades dels paràmetres de composició i cabal dels tres arxius diferents d'afluent que presenta el Benchmark.

Taula 3.10. Components de l'afluent dels tres escenaris que presenta el Benchmark.

Component	Temps Sec	Tempesta	Pluja	Unitats
S_s	69.50	64.93	60.13	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$
$X_{B,H}$	28.17	27.25	24.37	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$
X_s	202.32	193.32	175.05	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$
X_i	51.20	51.92	44.30	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$
S_{NH}	31.56	29.48	27.30	$g \text{ N} \cdot m^{-3}$
S_i	30.00	28.03	25.96	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$
S_{ND}	6.95	6.49	6.01	$g \text{ N} \cdot m^{-3}$
X_{ND}	10.59	10.24	9.16	$g \text{ N} \cdot m^{-3}$
Q_{en}	18446	19745	21320	$m^3 \cdot d^{-1}$

Les figures 3.10, 3.11 i 3.12 representen l'evolució del cabal en cadascuna de les situacions: escenari temps sec, temps de tempesta i de pluja respectivament.

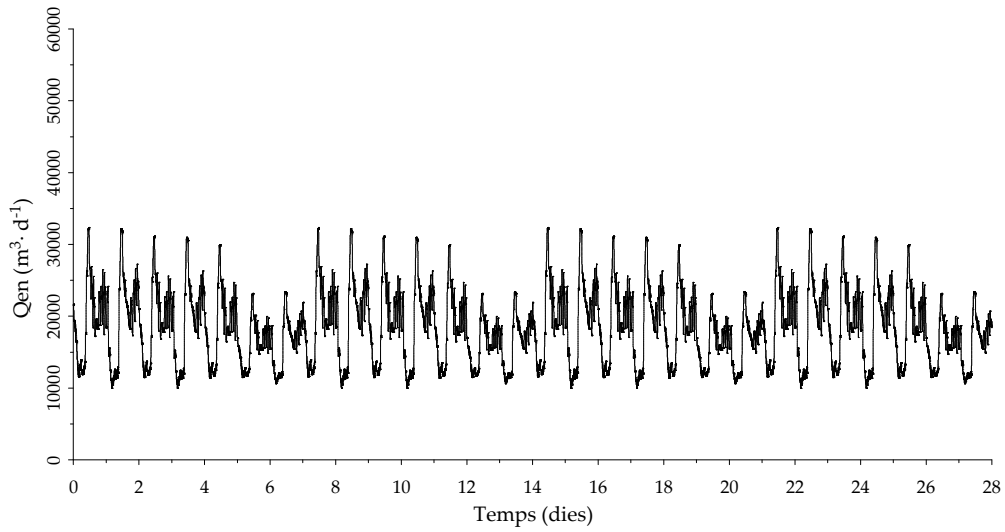


Figura 3.10. Evolució del cabal d'entrada durant les quatre setmanes de l'escenari temps sec.

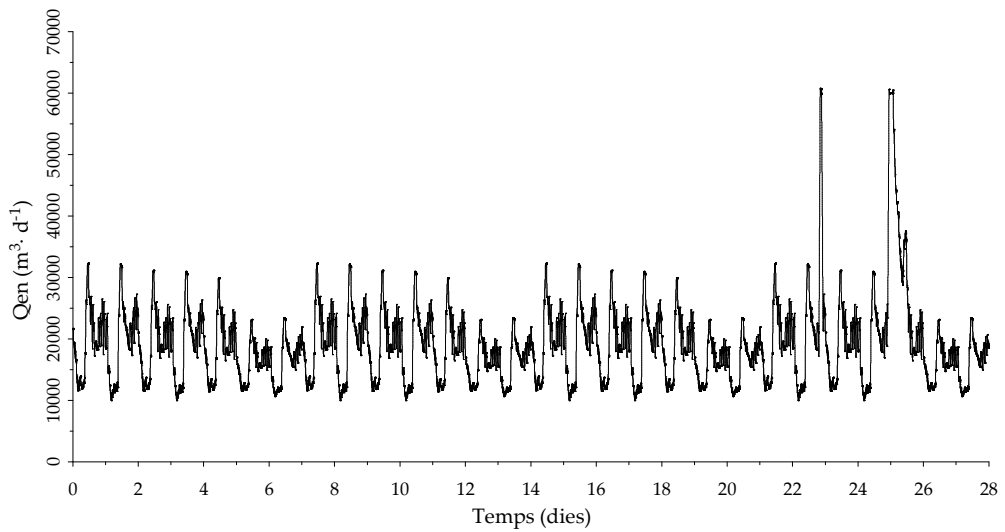


Figura 3.11. Evolució del cabal d'entrada durant les quatre setmanes de l'escenari temps de tempesta.

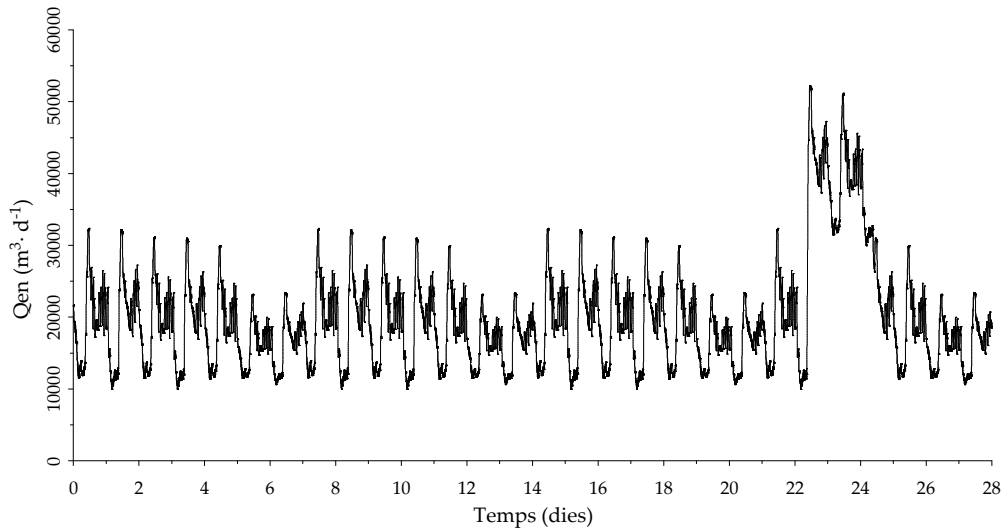


Figura 3.12. Evolució del cabal d'entrada durant les quatre setmanes de l'escenari temps de pluja.

III.3.4. Simulacions

III.3.4.1. Simulacions en Estat Estacionari

El primer pas en el procediment és simular el sistema amb condicions d'estat estacionari (EE) utilitzant un afluent constant en composició i cabal. Totes les simulacions dinàmiques han de partir de simulacions en EE. Això assegura un punt de partida consistent a l'hora de generar un efluent dinàmic. En el cas del protocol Benchmark, les dades d'afluent emprades per trobar l'EE són les dades de cabal i composició mitjanes de l'escenari temps sec (veure columna temps sec de la taula 3.10).

III.3.4.2. Simulacions en dinàmic

El següent pas és obtenir els resultats de les simulacions dinàmiques. Segons el protocol Benchmark, es parteix de l'EE aconseguit en el pas anterior i com a entrada dinàmica s'utilitza l'arxiu on la planta està en condicions normals amb l'objectiu de simular 14 dies. Les variables d'estat resultants es guarden per totes les unitats. Aquestes variables d'estat representen el principi de la resposta del model en dinàmic. A partir d'aquest punt, es simulen els 14 dies restants utilitzant un altre cop condicions normals, tempesta i pluja (els tres per separat). Així s'obtenen tres simulacions dinàmiques corresponents a 28 dies normal-normal, normal-tempesta i normal-pluja. Tot i això, les dades d'interès són les corresponents als 7 últims dies.

III.3.5. Índexs

L'avaluació del comportament en dinàmic de les diferents estratègies de control es duu a terme mitjançant el càlcul d'una sèrie d'índexs dissenyats prèviament. Aquest conjunt d'índexs es poden subdividir amb els de primer nivell o de procés i els de segon nivell o de control.

III.3.5.1. Índexs de procés

Els índexs de procés, com el seu nom indica, quantifiquen l'efecte de l'estratègia de control sobre el funcionament del procés de la instal·lació. Aquests tipus d'índexs es poden dividir en tres subnivells:

- Qualitat de l'efluent
- Violacions de l'efluent
- Costos operacionals

▪ Qualitat de l'efluent

Amb aquest paràmetre es quantifica en un sol terme la càrrega contaminant de l'efluent sobre medi receptor. L'equació 3.5 mostra el càlcul de l'índex de qualitat de l'efluent (EQ) amb unitats de kg de contaminació · d⁻¹. El càlcul es basa en integrar els 7 últims dies de simulació (t = 7).

$$EQ = \frac{1}{t \cdot 1000} \int_{t_0}^{t_0+7 \text{ dies}} [PU_{SST}(t) + PU_{DQO}(t) + PU_{DBO}(t) + PU_{NKT}(t) + PU_{NO}(t)] Q_e(t) dt \quad (3.5)$$

On:

Paràmetre	Factors β _i	Unitats
Q _e	-	m ³ ·d ⁻¹
t	-	dies
PU _{SST} (t)=β _{SST} SST _e (t)	β _{SST} = 2	g · m ⁻³
PU _{DQO} (t)=β _{DQO} DQO _e (t)	β _{DQO} = 1	g · m ⁻³
PU _{DBO} (t)=β _{DBO} DBO _e (t)	β _{DBO} = 2	g · m ⁻³
PU _{NKT} (t)=β _{NKT} NKT _e (t)	β _{NKT} = 20	g · m ⁻³
PU _{NO} (t)=β _{NO} NO _e (t)	β _{NO} = 20	g · m ⁻³

On Q_e és el cabal de l'efluent, SST_e són els SST de l'efluent, DQO_e és la DQO de l'efluent, DBO_e és la DBO de l'efluent, NKT_e és el NKT de l'efluent i NO_e són els nitrats/nitrits de l'efluent.

▪ Violacions de l'efluent

Per quantificar les violacions de l'efluent, el protocol Benchmark ha establert dos índexs, número de violacions i percentatge de temps en que la planta es troba en violació ja que el nombre de violacions per si sol, no té perquè reflectir la llargada del temps en que la planta es troba incomplint els límits establerts prèviament. El terme violació fa referència a l'incompliment de la normativa d'abocament, és a dir, la superació del límit de concentració dels paràmetres de l'efluent, fixats prèviament.

Els paràmetres que es tenen en compte a l'hora de comptabilitzar les violacions són l'amoni, el nitrogen total, la DBO, la DQO i els SST de l'efluent. La taula 3.11 presenta els valors de restricció d'aquests paràmetres en el protocol Benchmark.

Taula 3.11. Restriccions de l'efluent per les cinc variables a tenir en compte pel càlcul dels índexs de nombre de violacions i temps de violació.

Símbol	Variables	Valor del límit	Unitats
$S_{NH,e}$	Amoni de l'efluent	4	$gN \cdot m^{-3}$
$N_{tot,e}$	Nitrogen total de l'efluent	18	$gN \cdot m^{-3}$
DBO_e	DBO_5 de l'efluent	10	$gDBO \cdot m^{-3}$
DQO_e	DQO total de l'efluent	100	$gDQO \cdot m^{-3}$
SST_e	SST de l'efluent	30	$gSS \cdot m^{-3}$

▪ **Costos operacionals**

Els costos operacionals són considerats segons tres aspectes: producció de fang, energia de bombeig i energia d'aeració. Tots ells són calculats amb la integració dels 7 dies últims de simulació (ja sigui en l'escenari temps sec, com en el de tempesta o pluja).

- **Producció de fang:** aquest aspecte és quantificat per dos índexs; fangs a deposició i producció total de fangs.

a. **Fangs a deposició (P_{fangs}):** és la variació de fangs en el sistema més la quantitat de fangs purgat

$$P_{fangs} = \frac{1}{t} [\Delta SST_{sistema} + SST_{purga}] * 1000 \quad (3.6)$$

On: P_{fangs} = quantitat de fangs a deposició, $kg \cdot d^{-1}$

t = temps, dies

$\Delta SST_{sistema}$ = variació de fangs en el sistema, que és el resultat de restar la quantitat de fangs l'últim dia de simulació (el dia 28) menys el primer dia de càlcul de l'índex (el dia 21):

$$\Delta SST_{sistema} = (SST_{sistema})_{dia\ 28} - (SST_{sistema})_{dia\ 21} \quad (3.7)$$

On els SST en el sistema es calculen com la suma dels SST del reactor més els SST al

$$SST_{sistema}(t) = SST_{reactor}(t) + SST_{decantador}(t) \quad (3.8)$$

$$SST_{reactor}(t) = 0.75 \sum_{i=1}^{i=n} (X_{s,i} + X_{l,i} + X_{BH,i} + X_{BA,i} + X_{P,i}) V_i \quad (3.9)$$

On: i = reactors

n = número de reactors

V_i = volum del reactor i, m^3

X = components particulats, $g \cdot m^{-3}$

SST_{purga} = quantitat de fang purgat durant els últims set dies de simulació:

$$SST_{purga} = 0.75 \int_{t_0}^{t_0+7\text{dies}} (X_{s,w}(t) + X_{l,w}(t) + X_{BH,w}(t) + X_{BA,w}(t) + X_{P,w}(t)) Q_w \cdot dt \quad (3.10)$$

On: Q_w = cabal de purga, $m^3 \cdot d^{-1}$

t = temps, dies

b. Producció total de fangs (P_{fangs_total}): és la quantitat de fangs a deposició més els fangs de l'efluent

$$P_{fangs} = \frac{1}{t} [P_{fangs} + SST_{efluent}] * 1000 \quad (3.11)$$

On: P_{fangs} = quantitat de fangs a deposició, $kg \cdot d^{-1}$

t = temps, dies

$SST_{efluent}$ = quantitat de sòlids de l'efluent durant els 7 últims dies de simulació:

$$SST_{efluent} = 0.75 \int_{t_0}^{t_0+7 \text{ dies}} (X_{s,e}(t) + X_{l,e}(t) + X_{BH,e}(t) + X_{BA,e}(t) + X_{P,e}(t)) Q_e \cdot dt \quad (3.12)$$

On: Q_e = cabal de l'efluent, $m^3 \cdot d^{-1}$

t = temps, dies

- **Energia de bombeig (PE):** aquest aspecte quantifica el consum d'energia de bombeig pel cabal de recirculació interna (nitrats), de recirculació externa (fangs activats) i de purga.

$$PE = \frac{0.04}{t} \int_{t_0}^{t_0+7 \text{ dies}} [Q_a(t) + Q_r(t) + Q_w(t)] dt \quad (3.11)$$

On: PE = energia de bombeig, $kW \cdot h \cdot d^{-1}$

0.04 és el consum energètic estàndard de bombeig, en unitats de $Kw \cdot h \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$

t = temps, dies

$Q_a(t)$ = cabal de recirculació interna en el temps t , $m^3 \cdot d^{-1}$

$Q_r(t)$ = cabal de recirculació externa en el temps t , $m^3 \cdot d^{-1}$

$Q_w(t)$ = cabal de purga en el temps t , $m^3 \cdot d^{-1}$

- **Energia d'aeració (AE):** aquest aspecte quantifica el consum d'energia degut a l'aeració del procés.

$$AE = \frac{24}{t} \int_{t_0}^{t_0+7 \text{ dies}} \sum_{i=1}^{i=5} [0.4032 K_{La_i}(t)^2 + 7.8408 K_{La_i}(t)] dt \quad (3.13)$$

On: $K_{La_i}(t)$ = coeficient de transferència de masses en el reactor airejat i al temps t , h^{-1}

III.3.5.2. Índexs de control

El segon nivell de quantificació de l'efecte sobre les estratègies de control es calcula sobre el funcionament del propi controlador a partir de dos aspectes:

- Funcionament de les variables controlades
- Funcionament de les variables manipulades

▪ Funcionament de les variables controlades

Els índexs per quantificar el funcionament de les variables controlades són quatre:

a. Integral de l'error absolut (IAE), que es calcula com:

$$IAE_j = \int_{t_0}^{t_0+7 \text{ dies}} |e_j| dt \quad (3.14)$$

On: IAE_j = valor de l'error absolut de la variable j , *adimensional*
 j = variable controlada del sistema
 e_j = error de la variable controlada j , que és la diferència entre el valor desitjat i el valor mesurat.

b. Integral de l'error al quadrat (ISE), que es calcula com:

$$ISE_j = \int_{t_0}^{t_{7dies}} e_j^2 dt \quad (3.15)$$

On: ISE_j = valor de l'error al quadrat de la variable j , *adimensional*

c. Màxima desviació del punt de consigna, que es calcula com:

$$\max(Dev_j^{error}) = \max|e_j| \quad (3.16)$$

On: $\max(Dev_j^{error})$ = valor de la màxima desviació del punt de consigna de la variable j , *adimensional*

d. Variància en l'error de la variable controlada, que es calcula com:

$$Var(e_j) = \frac{ISE}{t} - \left(\frac{IAE_j}{t} \right)^2 \quad (3.17)$$

On: $Var(e_j)$ = variància de l'error de la variable j , *adimensional*

▪ **Funcionament de les variables manipulades**

Els índexs per quantificar el funcionament de les variables manipulades són tres:

a. Màxima desviació en la variable manipulada, que es calcula com:

$$\max(Dev_j^{MV}) = u_{j,max} - u_{j,min} \quad (3.18)$$

On: $\max(Dev_j^{MV})$ = màxima desviació de la variable manipulada j

$u_{j,max}$ = és el valor màxim de la variable manipulada durant els 7 últims dies de simulació

$u_{j,min}$ = és el valor mínim de la variable manipulada durant els 7 últims dies de simulació

b. Màxima desviació en el canvi de valor de la variable manipulada, que es calcula com:

$$\max(Dev_j^{\Delta u_j}) = \max(\Delta u_j) \quad (3.19)$$

On: $\max(Dev_j^{\Delta u_j})$ = màxima desviació en el canvi de valor de la variable manipulada j

Δu_j = canvi de valor de la variable manipulada j definida com:

$$\Delta u_j = |u_j(t+dt) - u_j(t)| \quad (3.20)$$

c. Variància en el canvi de valor de la variable manipulada, que es calcula com:

$$Var(\Delta u_j) = \overline{\Delta u_j^2} - (\overline{\Delta u_j})^2 \quad (3.21)$$

On:

$$\overline{\Delta u_j^2} = \frac{\int_{t_0}^{t_0+7\text{dies}} \Delta u_j^2 dt}{t} \quad (3.22)$$

$$\overline{\Delta u_j} = \frac{\int_{t_0}^{t_0+7\text{dies}} \Delta u_j dt}{t} \quad (3.23)$$

III.4. INSTRUMENTACIÓ

En la taula 3.12 es resumeix la instrumentació que ha estat necessària pel seguiment en continu i implementació dels SCLD que s’expliquen en la present tesi. En la primera meitat de la taula s’enumeren els sensors i elements necessaris per implementar el SCLD per controlar la concentració dels SS de l’efluent a l’EDAR Granollers, mentre que la segona meitat de la taula presenta la instrumentació bàsica per implementar el SCLD per l’eliminació biològica del nitrogen a l’EDAR Taradell.

Taula 3.12. Instrumentació utilitzada en les EDAR on s’han implementat els SCLD que es presenten en aquesta tesi.

Paràmetre	Instrumentació	Tipus	EDAR
Cabal d’entrada	Cabalímetre electromagnètic	Promag 30 (Endress Hauser)	
	Cabalímetre electromagnètic	Promag 30 (Endress Hauser)	
Cabal de recirculació	Variador de freqüència	Allen-Bradley 1336 PLUS II (Rockwell Automation)	Granollers
	Bombes submergibles	CP-3170-LT (FLYGT)	
SS efluent	Sensor	Solitax sc (Lange)	
OD	Sensor	Endress Hauser	
Potencial Òxido-Reductor	Sensor	Crison	
Aeració	Variador de freqüència	Telemecanique	Taradell
	Difusors de membrana	ITT FLYGT membrane difuser. Sanitaire 9''	
	Bufador (compressor)	RB 90 (ROBUSCHI)	

L’aplicació pel SCLD_SS de l’EDAR Granollers ha estat desenvolupada amb el llenguatge de programació JAVA® de Sun Microsystems, Inc. Per implementar la interfície d’usuari s’ha utilitzat la llibreria integrada dins de l’API (Application Programation Interface) de JAVA anomenada javax.swing. Aquesta llibreria aporta mètodes senzills per crear finestres, etiquetes i botons entre d’altres components visuals. Per programar el SCLD s’ha utilitzat l’eina FuzzyJava. Aquest recurs s’afegeix a l’API de JAVA i ofereix funcions per crear les variables difuses, desenvolupar les regles ‘Si-Llavors’, i introduir el mètode d’inferència i defuzzificació per obtenir resultats de manera simple i eficaç (Sazonov *et al.*, 2002).

L’aplicació pel SCLD_N de l’EDAR Taradell ha estat desenvolupada utilitzant el llenguatge de programació ObjectPascal, mitjançant el programa Borland® Delphi®, mentre que el desenvolupament del SCLD_N s’ha realitzat mitjançant la FLT de MATLAB. El programa desenvolupat crida la FLT per executar el SCLD_N i gestiona les variables d’entrada i sortida del sistema de control a la vegada que proporciona una interfície gràfica per l’usuari.

**SISTEMA DE CONTROL BASAT EN LÒGICA DIFUSA PELS SÒLIDS EN
SUSPENSÍO DE L'EFLUENT DE L'EDAR GRANOLLERS**

IV. SISTEMA DE CONTROL BASAT EN LÒGICA DIFUSA PELS SÒLIDS EN SUSPENSÍO DE L'EFLUENT DE L'EDAR GRANOLLERS

IV.1. PRESENTACIÓ

Les condicions d'un Sistema de Fangs Activats (SFA) són diferents segons el seu disseny, la variabilitat del cabal i les característiques de sedimentació del fang, per la qual cosa és difícil fer un seguiment correcte del procés i entendre les relacions entre el cabal de recirculació de fangs, les característiques de la biomassa, l'expansió del mantell de fangs i la variació diürna de cabal (WEF, 1996). Per aquesta raó, la definició d'un controlador automàtic que determini en cada instant el cabal de recirculació necessari per mantenir un bon estat del decantador i una bona qualitat de l'efluent (minimització de la concentració de Sòlids en Suspensió (SS)), comportaria una contribució significativa en la millora del funcionament de les EDAR.

Com s'ha explicat en la introducció, la concentració de SS de l'efluent està determinada, en gran part, pel correcte disseny i operació del decantador secundari. Un cop construït el decantador, aconseguir un efluent òptim en relació a la minimització de la concentració de SS, dependrà majoritàriament de la seva operació i de les condicions del fang activat. Gestionar el decantador de manera correcta és clau per obtenir un fang compactat correctament i un sobrenedant clar que permeti aconseguir un efluent amb baixes concentracions de SS.

En aquest capítol es descriu en detall el procés de disseny i implementació d'un Sistema de Control basat en Lògica Difusa per controlar la concentració de Sòlids en Suspensió de l'efluent (SCLD_SS). En l'apartat IV.2, es plantegen els objectius d'aquest capítol. En el següent apartat (IV.3), es descriu en detall la instal·lació on s'implementa el SCLD_SS, l'EDAR Granollers. A continuació, en l'apartat IV.4, es defineixen un conjunt d'índexs d'avaluació i índexs de comparació, desenvolupats per quantificar l'eficàcia del sistema de control d'acord amb els objectius preestablerts.

Determinats els objectius, descrita l'EDAR i definits els índexs, aquest capítol es diferencia en dues grans etapes:

a) disseny (apartat IV.5) i b) implementació del SCLD_SS (apartat IV.6).

a) Disseny del SCLD_SS: com en el disseny de qualsevol sistema de control, en primer lloc s'identifiquen i es seleccionen les variables que formen part de l'estructura del llaç de control, és a dir, les variables controlades, mesurades i manipulades (apartat IV.5.1). Un cop determinades aquestes variables, es descriu detalladament el sistema de control basat en lògica difusa (apartat IV.5.2): es presenta la definició de les variables difuses del SCLD_SS (que consisteix en seleccionar les funcions de pertinença que defineixen cada variable difusa així com el nombre, forma, simetria i solapament d'aquestes) i el desenvolupament de les regles 'Si-Llavors' juntament amb la selecció del mètode d'inferència i defuzzificació que es va utilitzar per l'execució del controlador. Concretament es presenten vuit matrius de regles difuses que donen lloc a vuit opcions

diferents de SCLD_SS. En un tercer apartat (IV.5.3) s'expliquen en detall els dos estudis de simulació realitzats per a l'avaluació dels SCLD_SS: un primer, utilitzant un model de planta estandarditzada i un segon amb el model de l'EDAR Granollers, realitzat amb l'objectiu d'avaluar el comportament dels SCLD_SS seleccionats del primer estudi. Mentre que en el primer estudi de simulació dels SCLD_SS s'utilitza el protocol Benchmark (Copp, 2002), amb un model de planta estandarditzada i uns escenaris predefinitos, en el segon estudi s'utilitza el model de l'EDAR on posteriorment s'implementa el SCLD_SS.

b) Implementació del SCLD_SS: en el primer punt de la implementació s'identifiquen les restriccions de tipus físic o de procés que afecten l'execució del SCLD_SS (apartat IV.6.1). A continuació, en l'apartat IV.6.2, s'explica com es va definir el SCLD_SS tenint en compte les consideracions del cap de planta, així com la variació dels rangs de valors i funcions de pertinença de les variables difuses del sistema de control perquè s'adeqüés a l'EDAR real. A continuació, es descriu com es va introduir el SCLD_SS en les estructures de control automàtic que ja existien a l'EDAR Granollers i el desenvolupament d'una aplicació informàtica per l'usuari per tal que, en qualsevol moment, es pogués modificar la configuració del SCLD_SS (apartat IV.6.3). Finalment, en l'apartat IV.6.4 es presenten els resultats de validació del SCLD_SS implementat a l'EDAR Granollers.

Per acabar, es presenta una discussió sobre el treball realitzat en aquest capítol, des del disseny del SCLD_SS fins la seva implementació i validació a l'EDAR Granollers (apartat IV.7).

IV.2. OBJECTIUS

L'objectiu principal d'aquest estudi és el disseny i la implementació d'un SCLD a l'EDAR Granollers per tal de:

- minimitzar l'impacte dels SS al medi receptor,
- minimitzar el consum energètic i
- afavorir l'estabilitat del decantador.

Per dur-ho a terme, es van concretar els següents objectius parcials:

1. Caracterització de l'EDAR Granollers.
2. Definició d'índexs d'avaluació i comparació que permetin quantificar l'eficiència del SCLD respecte els objectius fixats, en l'estudi de simulació i en la validació a l'EDAR real.
3. Disseny del SCLD per controlar la concentració dels SS a l'efluent (SCLD_SS). Aquest disseny implica la identificació i definició de les variables, el desenvolupament de la matriu de decisió i l'especificació dels mètodes de composició, inferència i defuzzificació del sistema de control.
4. Avaluació per simulació del funcionament del SCLD_SS, amb un model tipus de la planta Benchmark i amb el model de l'EDAR Granollers, on s'implementarà el sistema de control.

5. Implementació del SCLD_SS a l'EDAR Granollers. Aquesta implementació inclou el desenvolupament del controlador en un programa informàtic, el desenvolupament d'una interfície gràfica per l'usuari i la integració del SCLD_SS en el funcionament general de l'EDAR.
6. Validació i discussió del funcionament del SCLD_SS implementat.

IV.3. L'EDAR GRANOLLERS

L'EDAR Granollers va ser la instal·lació on es va implementar i validar el SCLD_SS que es presenta en aquest capítol. A continuació s'explica en detall la seva configuració, la caracterització de l'aigua d'entrada, el monitoratge i l'operació del procés així com els rendiments d'eliminació que s'assoleixen.

IV.3.1. Descripció de l'EDAR Granollers

L'EDAR Granollers pertany a la conca del riu Besòs. Aquesta estació depuradora va ser construïda l'any 1992, amb un pretractament i un tractament fisicoquímic per eliminar els SS i la Matèria Orgànica (MO). L'any 1998, es va fer una ampliació de les instal·lacions amb la introducció d'un tractament biològic que va reemplaçar el tractament fisicoquímic. Més endavant la planta va ser modernitzada amb la configuració actual de Ludzack-Ettinger modificat. Actualment, l'EDAR Granollers elimina SS, MO i, sota algunes condicions, el nitrogen contingut en les aigües residuals d'aproximadament 150,000 habitants equivalents. L'afluent que arriba a l'EDAR prové de les clavegueres que recullen tant les aigües residuals urbanes com industrials de la zona. La figura 4.1 mostra l'EDAR Granollers en vista aèria.



Figura 4.1. Fotografia aèria de l'EDAR Granollers

El conjunt del procés de tractament de les aigües residuals de l'EDAR Granollers es divideix en dues línies principals: aigua i fang. La línia d'aigua consta de tres fases: pretractament, tractament primari i secundari. La configuració del tractament secundari (tractament biològic) és Ludzack-Ettinger o Ludzack-Ettinger modificat segons l'època de l'any, que permet o no l'eliminació del nitrogen. La línia de fangs està formada per les següents unitats: espessiment, digestió anaeròbia, deshidratació, assecat tèrmic i disposició final del fang a un abocador controlat. La figura 4.2 presenta el diagrama de procés de la línia d'aigua i de fang (amb excepció dels digestor anaeròbics i unitats de deshidratació) de l'EDAR Granollers.

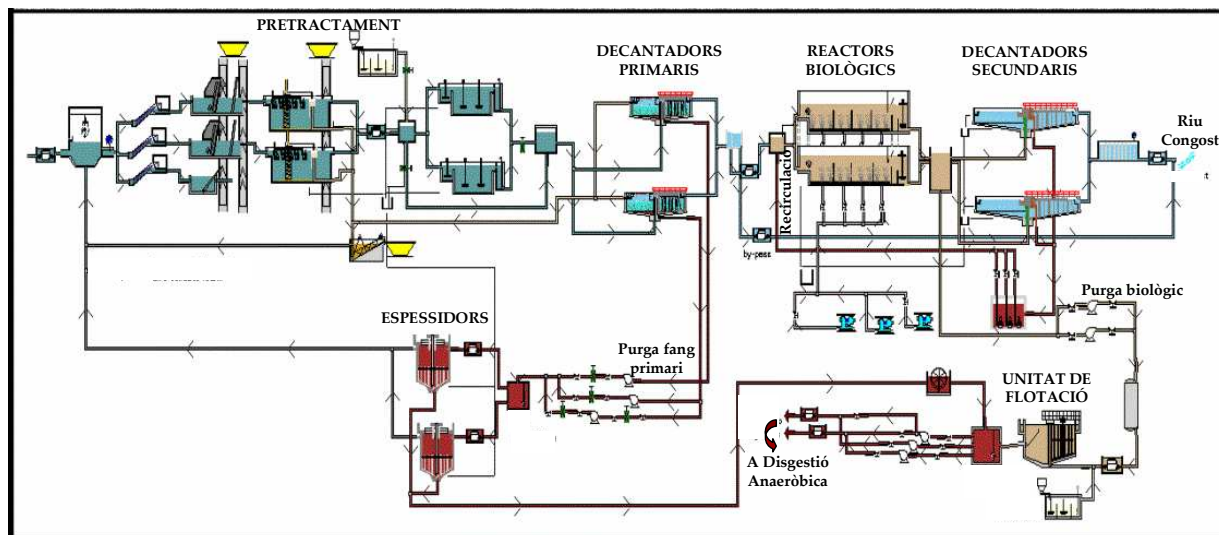


Figura 4.2. Diagrama de flux de la línia d'aigua de l'EDAR Granollers (adaptat de Comas, 2000).

L'aigua residual de capçalera és impulsada mitjançant tres cargols d'Arquímedes (cadascun d'ells bombeja $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). No obstant, es treballa només amb un cargol durant la major part del dia i amb un segon quan hi ha els pics de cabal diaris (el tercer cargol existeix com a reserva). Durant períodes de tempesta o pluja, l'EDAR és capaç d'absorbir tres vegades el cabal d'entrada en temps sec.

El pretractament inclou l'eliminació de les partícules més grosses i l'eliminació de sorres i flotants mitjançant tamisos de fins (amb neteja automàtica) i desgreixadors-dessorradors. La funció del pretractament és eliminar les partícules més grans a la vegada que es protegeix la maquinària a utilitzar posteriorment.

El tractament primari consta de dos decantadors primaris per sedimentar la major part de sòlids en suspensió. Algunes vegades, un dels decantadors actua com a tanc homogeneïtzador per evitar xocs hidràulics i oscil·lacions de càrrega. El fang en excés és purgat intermitentment des dels decantadors primaris amb un cabal de $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Aquest fang primari és espessit mitjançant dos espessidors abans de barrejar-se amb els fangs biològics en excés provinents de la unitat de flotació.

A continuació l'aigua passa al tractament biològic secundari amb un cabal màxim de $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. En aquest punt torna a haver-hi un bypass quan es supera el cabal màxim que pot tractar el tractament biològic.

El cabal provinent del tractament primari es distribueix en dues línies paral·leles de tractament biològic. Aquest consisteix en el sistema convencional, el sistema de fangs activats, que engloba el reactor biològic i decantador secundari. Cada línia consta d'un selector anòxic de 400 m³ localitzat al principi del tanc d'aeració i un reactor flux-pistó de 3664 m³ compartimentat en 4 tancs. Aquest reactor flux pistó és equivalent a un reactor facultatiu (airejat si no es vol eliminar nitrogen i anòxic quan s'elimina el nitrogen) i 3 tancs airejats de mescla completa. L'aeració és proporcionada mitjançant difusors de bombolla fina. Al final de les dues línies biològiques, el fang activat és recollit en un petit tanc de desaeració de 10 m³ d'on es purga l'excés de fang cap a una unitat de flotació amb un cabal de 65 m³·h⁻¹. Des del tanc de desaeració, el corrent de l'aigua va a parar a les unitats de decantació. Cada decantador secundari és de tipus circular amb una superfície de 707 m² i 3.20 m de tirant d'aigua. El fang decantat és recollit per succió.

Existeixen tres bombes de recirculació disponibles per recircular el fang sedimentat del decantador secundari als reactors biològics. El màxim cabal a recircular és el de dues bombes en funcionament (1200 m³·h⁻¹), ja que la tercera és de reserva.

Una fracció de l'efluent tractat és reutilitzat pels serveis de l'EDAR després de ser filtrat amb un filtre de sorra. La resta d'efluent és abocat al riu Congost.

IV.3.2. Caracterització de l'aigua d'entrada de l'EDAR Granollers.

El cabal i les concentracions típiques de l'aigua d'entrada de l'EDAR Granollers es troben enumerades a la taula 4.1. Aquests valors han estat obtinguts de l'anàlisi estadístic de les dades històriques recollides des de gener del 2003 fins maig del 2005 (28 mesos).

Taula 4.1. Descriptors bàsics estadístics de les característiques de l'afluent a l'EDAR Granollers.

Paràmetres	Mitjana	Desviació Estàndard	Mín.	Màx.
Qen (m ³ ·d ⁻¹)	24490	3686	10300	52800
pH	7.7	0.2	6.6	8.7
Conductivitat (μS·cm ⁻¹)	2681	510	800	7800
DQO (g O ₂ · m ⁻³)	665	163	96	1930
DBO (g O ₂ · m ⁻³)	384	86	120	850
SS (g · m ⁻³)	294	111	56	1000
TKN (g N · m ⁻³)	63	9	24	116
NH ₄ ⁺ (g N · m ⁻³)	43	6	17	71
Ptotal (g P · m ⁻³)	11.7	2.3	4.2	22.7

L'aigua residual que arriba a l'EDAR Granollers varia amb els dies, setmanes i fins i tot entre estacions. El pic de cabal diari arriba a partir de les 8 del matí i es manté durant la major part del dia, amb petites oscil·lacions, fins a la mitjanit. A partir de les 22 – 24 hores, el cabal tendeix a disminuir, assolint el mínim entre les 4 i les 6 hores de

la matinada aproximadament (figura 4.3). El pic de cabal diari excedeix el cabal mig des d'un 40-50% (en situacions normals, com l'exemple de la figura 4.3) fins el 150% (en casos extrems). El cabal mitjà representa un temps de retenció hidràulica en el reactor d'unes 8 hores.

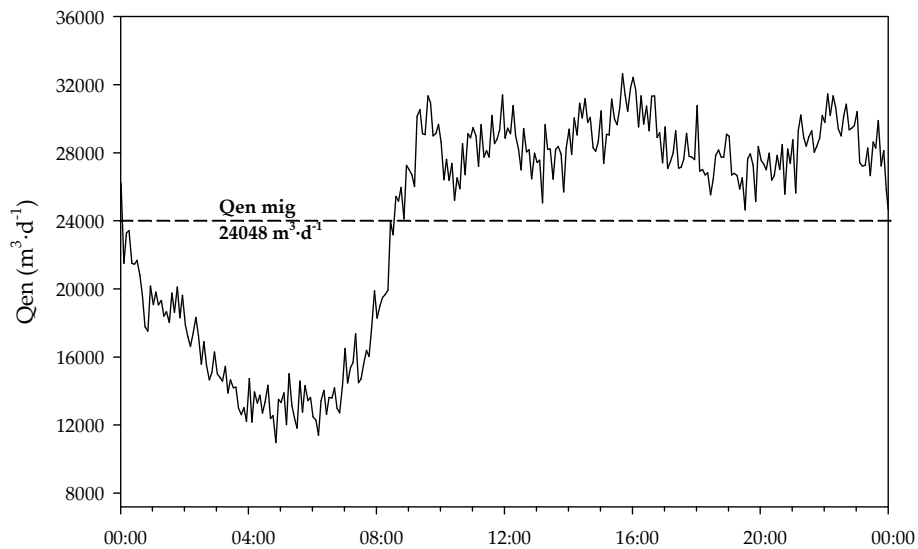


Figura 4.3. Perfil diari típic del cabal d'entrada de l'EDAR Granollers d'un dia laboral (21 de desembre de 2004).

Degut a que l'EDAR no tracta només aigües residuals d'origen urbà sinó també industrials, existeix una diferència de perfils de cabal entre els dies laborals i festius. La figura 4.4 presenta un perfil setmanal del cabal d'entrada.

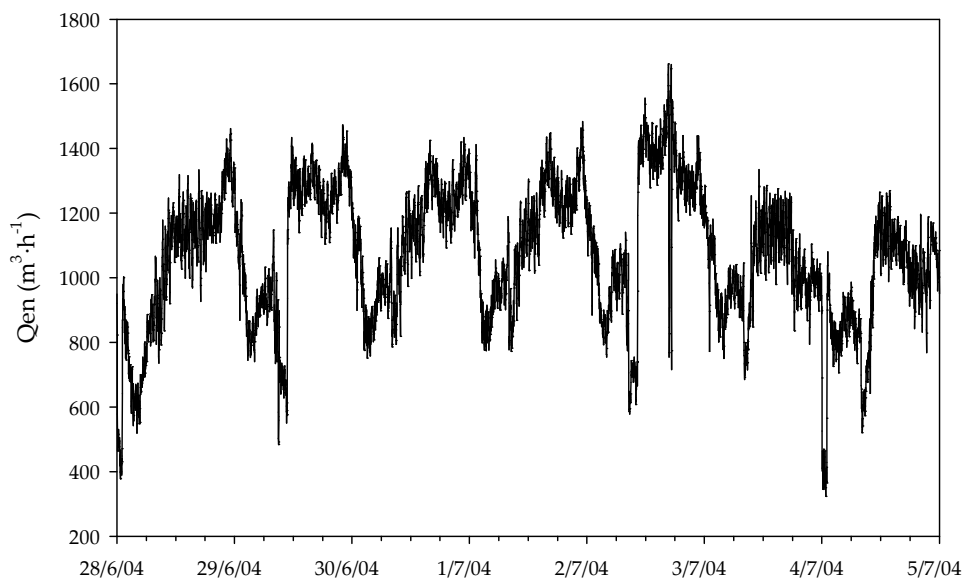


Figura 4.4. Perfil setmanal típic del cabal d'entrada de l'EDAR Granollers (del 28 de juny al 4 de juliol de 2004)

IV.3.3. Monitoratge de l'EDAR Granollers

Segons les dimensions i tipus d'EDAR es té més o menys disponibilitat de dades de monitoratge. El conjunt de dades quantitatives (obtingudes via laboratori o per sensors) i el nivell d'instrumentació en línia que presenta una EDAR determinen, en gran part, la possibilitat d'introduir controls automàtics en la seva operació. La taula 4.2 presenta de forma resumida tota la informació quantitativa disponible en la línia d'aigua de l'EDAR Granollers, dividida segons la font de mesura, la variable mesurada i la localització del punt de mostreig.

Taula 4.2. Dades quantitatives mesurades en l'EDAR Granollers (adaptat de Comas, 2000).

Font	Paràmetres	Símbols	Ref. Mètode	Punt de mostreig
Analítica	Demanda Química d'Oxigen	DQO	UNE-EN 77004	Afluent, Efluent primari, i Efluent
	Demanda Biològica d'Oxigen	DBO ₅	*Std. Met. 5210B	
	Sòlids en Suspensió	SS	UNE-EN 872	
	Terbolesa	Terb.	-	
	Amoni	NH ₄ ⁺	UNE-EN 77028	
	Nitrogen Kjeldhal Total	NKT	UNE-EN 25663	
	Nitrits/Nitrats	NO ₂ /NO ₃ ⁻	*Std. Met. 4110C	
	Fòsfor Total	P _t	UNE-EN 1189	
	Temperatura	T	-	
	Conductivitat	Cond.	UNE -EN 27888	
	Sòlids en Suspensió del Licor Mescla	SSLM	UNE-EN 872	Reactors biològics i Recirculació externa
	Sòlids en Suspensió Volàtils del Licor Mescla V30	SSLMV V30	*St. Met. 2540B, E -	
	Alçada de fangs	AF	-	
Sensors	pH	pH	M. Electromètric	Afluent i Efluent
	Concentració d'Oxigen dissolt Potencial d'Òxido - Reducció	OD ORP	M. Electromètric	Reactors biològics
	Cabals	Q	M. Electromagnètic	Afluent, Efluent primari, Efluent, Aeració, Recirculació interna, Recirculació externa i Purga
	Sòlids en Suspensió	SS	M. Fotomètric	Reactors biològics i Efluent

*Standard Methods for the examination of water and wastewater (APHA et al., 1998)

Totes les dades obtingudes en continu mitjançant sensors, són recollides per un sistema d'adquisició de dades amb l'objectiu de ser utilitzades per a la supervisió i control automàtic amb que funciona el procés. En aquest cas el sistema és un SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) Wizcon®.

IV.3.4. Operació i control de l'EDAR Granollers

L'EDAR Granollers compta amb cinc llaços de control automàtic:

1. Laminació del cabal d'entrada a biològic: la laminació del cabal s'obté mitjançant les unitats de decantació primària. Quan el cabal d'entrada és més elevat que el cabal mig, un dels decantadors primaris actua com a tanc de retenció. Al contrari, quan el cabal és menor que el cabal mig, es buida el decantador primari que actuava com a tanc de retenció.
2. Bypass abans del tractament biològic: quan el cabal és superior als $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, l'excés de cabal és abocat directament al riu Congost.
3. Purga: l'operació de la purga es realitza en funció de la concentració de sòlids en el reactor. Es fixa un punt de consigna de concentració de sòlids al reactor i es varia la purga per aconseguir aquest valor desitjat. El punt de consigna pot variar segons el criteri de l'expert.
4. Aeració: el control de l'oxigen dissolt en els reactors biològics es dut a terme per un controlador PI en cascada a partir de la concentració d'OD i el cabal d'aire. Els valors de consigna de cada compartiment del reactor varien en funció de si es vol o no eliminar nitrogen.
5. Recirculació: existeix un controlador PI (figura 4.5) que ajusta el funcionament de les bombes de recirculació a un valor desitjat que és introduït manualment. Prèviament a la implementació del SCLD_SS, aquest punt de consigna era de $14400 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$.

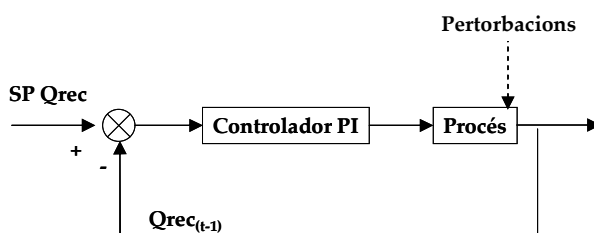


Figura 4.5. Estructura del controlador PI del cabal de recirculació de l'EDAR Granollers

IV.3.5. Rendiments d'eliminació de l'EDAR Granollers.

La taula 4.3 resumeix els rendiments d'eliminació de l'EDAR Granollers durant l'any 2004. Els rendiments d'eliminació respecte els SS, la DQO i la DBO₅ estan sempre al voltant del 90%, exceptuant el mes de febrer, quan disminueix el rendiment d'eliminació de SS i en conseqüència també es redueix el rendiment d'eliminació de matèria orgànica.

Taula 4.3. Mitjanes mensuals de rendiments d'eliminació de SS, matèria orgànica i nutrients juntament amb el cabal tractat de l'EDAR Granollers durant l'any 2004.

	Cabal tractat (m ³ ·d ⁻¹)	Rendiments d'eliminació (any 2004)				
		SS (%)	DQO (%)	DBO ₅ (%)	Ntotal (%)	Ptotal (%)
gener	21015	92.94	89.52	97.30	19.04	75.83
febrer	24150	68.70	78.02	89.07	-	21.78
març	24424	90.48	86.01	93.95	12.23	50.50
abril	26792	89.19	87.10	94.25	15.48	72.48
maig	25523	92.86	90.43	97.02	16.01	77.08
juny	22922	92.54	89.46	97.26	17.21	84.30
juliol	22916	94.06	91.07	97.58	56.23	77.67
agost	17261	96.90	93.80	97.97	64.53	71.53
setembre	22456	94.96	91.16	96.93	40.18	63.56
octubre	21659	95.98	91.93	97.08	16.31	67.94
novembre	21455	95.83	91.49	97.67	21.93	65.08
desembre	21460	92.24	88.24	96.25	10.83	38.19
Mitjana	22669.42	91.39	89.02	96.03	26.36	63.83

Respecte el nitrogen, els rendiments d'eliminació són baixos durant gairebé tot l'any, entre el 10 i el 20%. El procés de nitrificació a l'EDAR Granollers només es produeix durant els mesos de més temperatura, i és per això que només en els mesos d'estiu (juliol, agost i setembre) s'observa un increment de l'eliminació del nitrogen, entre un 40 i un 64%. En referència a l'eliminació de fòsfor, aquest es realitza mitjançant l'addició de clorur fèrric a la sortida del reactor biològic, aconseguint rendiments entre el 50 i el 80% durant gairebé tot l'any. Els mesos de febrer i desembre presenten rendiments més baixos degut a problemes d'addició del clorur fèrric.

IV.4. ÍNDEXS D'AVALUACIÓ

Els índexs utilitzats per quantificar l'eficàcia del SCLD_SS es van desenvolupar segons els objectius prèviament definits, tal i com es presenta en la taula 4.4 i 4.5. Es defineixen dos tipus d'índexs: índexs d'avaluació i índexs comparatius. Aquests últims es basen en la comparació de cadascun dels índexs d'avaluació respecte una situació de referència.

Es van definir dos índexs per avaluar l'impacte dels SS en el medi receptor: qualitat de l'efluent segons els SS (QE_{ss} / QE'_{ss}) i temps de violació del límit legal de SS de l'efluent (TV_{ss}). Aquests índexs són modificacions de dos índexs de qualitat prèviament definits pel protocol Benchmark (Copp, 2002): "effluent quality" i "effluent violations". Les modificacions realitzades es van basar en enfocar els dos nou índexs només a la qualitat de l'efluent segons els SS en lloc de tenir també en compte la MO i els nutrients, com passa amb els índexs originals. L'índex per avaluar el consum energètic de bombeig de la recirculació de fangs (CEB_{rec}), també es basà en un

índex operacional del protocol Benchmark (Copp, 2002): "Pumping Energy". L'índex CEB_{rec} quantifica només el consum energètic de bombeig degut a la recirculació mentre que l'índex "pumping energy" també té en compte altres consums. Finalment, es va desenvolupar un índex propi per determinar l'estabilitat del decantador (CumED).

Taula 4.4. Relació dels índexs d'avaluació desenvolupats per quantificar el nivell d'assoliment dels objectius fixats.

Objectiu específic	Índexs d'Avaluació		
	Descripció	Símbol	Unitats
Impacte a medi receptor	Qualitat de l'Efluent segons els SS	QE_{SS}	$kg\ SS \cdot d^{-1}$
		QE'_{SS}	$g\ SS \cdot m^{-3}$
	Temps de Violació del límit legal d'abocament dels SS	TV_{SS}	%
Consum Energètic	Consum de l'Energia de Bombeig del cabal de recirculació	CEB_{rec}	$kW \cdot h \cdot d^{-1}$
Estabilitat Decantador	Estabilitat del Decantador	CumED	Adimensional

Taula 4.5. Relació dels índexs comparatius, en funció dels índexs d'avaluació, desenvolupats per quantificar el nivell d'assoliment dels objectius fixats en els estudis de simulació.

Índexs d'Avaluació a comparar	Índexs Comparatius		
	Descripció	Símbol	Unitats
QE_{SS}	Diferència de la Qualitat de l'Efluent segons els SS	DQE_{SS}	%
TV_{SS}	Diferència del Temps de Violació del límit legal d'abocament dels SS	DTV_{SS}	%
CEB_{rec}	Diferència del Consum de l'Energia de Bombeig del cabal de recirculació	$DCEB_{rec}$	%
CumED	Diferència de l'Estabilitat del Decantador	$DCumED$	%

Atès que prèviament a aquest estudi, a l'EDAR Granollers es recirculava amb un cabal constant, es va utilitzar aquesta opció com l'estratègia de referència a l'hora de comparar els resultats dels índexs d'avaluació del funcionament del SCLD_SS. D'aquesta manera, els quatre índexs d'avaluació definits en la taula 4.4 (QE_{SS} , TV_{SS} , CEB_{rec} i CumED) van ser expressats en percentatges per convertir-se en els següents índexs comparatius (taula 4.5):

- Diferència de la Qualitat de l'efluent segons els SS de l'efluent (DQE_{SS}),
- Diferència del Temps de Violació del límit legal de SS de l'efluent (DTV_{SS}),
- Diferència del Consum Energètic del Bombeig de cabal de recirculació ($DCEB_{rec}$)
- Diferència de l'estabilitat del decantador ($DCumED$).

IV.4.1. Índex d'avaluació de la Qualitat de l'Efluent segons els Sòlids en Suspensió, QE_{SS} .

L'índex QE_{SS} és una modificació de l'índex 'Efluent Quality' definit pel protocol Benchmark (Copp, 2002), i té com objectiu avaluar la qualitat de l'efluent segons els kg de SS que s'aboquen al dia. QE_{SS} es calcula integrant la concentració de SS de l'efluent (SS_e) pel cabal de l'efluent (Q_e) al llarg del temps, segons l'equació 4.1..

$$QE_{SS} = \frac{1}{t \cdot 1000} \int_{t_0}^t SS_e \cdot Q_e dt \quad (4.1)$$

On: QE_{SS} en unitats de $kg\ SS \cdot d^{-1}$

SS_e en unitats de $g \cdot m^{-3}$

Q_e en unitats de $m^3 \cdot d^{-1}$

t és el temps en que s'avalua el procés, en unitats de dies.

Quant més baix sigui el valor de QE_{SS} menor quantitat de SS són abocats a medi receptor. Aquest índex pot ser calculat en l'estudi de simulació i en la realitat.

No obstant, quan s'utilitza en la realitat, és necessari canviar les unitats si es volen comparar diversos dies o períodes de temps. Treballar sempre amb la mateixa quantitat i variabilitat de cabal en els estudis de simulació permet comparar l'índex QE_{SS} amb unitats de $kg \cdot d^{-1}$ sense tenir en compte el cabal. En la realitat, com que el cabal no és el mateix cada dia, ha estat necessari redefinir QE_{SS} en QE'_{SS} , dividint la càrrega de SS diària ($kg\ SS \cdot d^{-1}$) que s'aboca al medi receptor pel cabal tractat diari ($m^3 \cdot d^{-1}$) de manera que s'obté exactament la quantitat abocada de SS al medi receptor per m^3 tractat (equació 4.2). D'aquesta manera es pot comparar la qualitat de l'efluent segons els SS_e de dos dies diferents amb cabals de recirculació diferent.

$$QE'_{SS} = \frac{QE_{SS}}{Q_{diari}} \cdot 1000 \quad (4.2)$$

On: QE'_{SS} en unitats de $g\ SS \cdot m^{-3}$

QE_{SS} en unitats de $kg\ SS \cdot d^{-1}$

Q_{diari} cabal tractat diari, en unitats de $m^3 \cdot d^{-1}$

IV.4.2. Índex comparatiu de la Diferència de la Qualitat de l'Efluent segons els Sòlids en Suspensió, DQE_{SS} .

L'índex de comparació DQE_{SS} indica en quin percentatge millora o empitjora la qualitat de l'efluent segons els SS_e respecte operar amb un cabal de recirculació de fangs constant. L'índex DQE_{SS} s'expressa en percentatge i es calcula segons l'equació 4.3.

$$DQE_{SS} = \left(\frac{QE_{SS} - QE_{SS_rec_ct}}{QE_{SS_rec_ct}} \right) \cdot 100 \quad (4.3)$$

On: DQ_{Ess} en unitats de %

Q_{Ess} és la quantitat de SS_e que s'aboca al dia quan s'opera amb qualsevol estratègia de recirculació externa, unitats de $kg \cdot d^{-1}$ per estudis de simulació i unitats de $g \cdot m^{-3}$ per estudis de validació en EDAR real.

$Q_{Ess_rec_ct}$ és la quantitat de SS_e que s'aboca quan s'opera amb cabal de recirculació externa constant, unitats de $kg \cdot d^{-1}$ per estudis de simulació i unitats de $g \cdot m^{-3}$ per estudis de validació en EDAR real.

Si l'índex DQ_{Ess} és negatiu, significa que hi ha una millora en la qualitat de l'efluent respecte operar amb cabal de recirculació constant. Si el valor DQ_{Ess} és zero, significa que no hi ha millora respecte l'estratègia de recirculació constant i si el valor és positiu, significa que hi ha un empitjorament de la qualitat de l'efluent respecte l'estratègia de recircular a cabal constant.

IV.4.3. Índex d'avaluació del Temps de Violació del límit legal de Sòlids en Suspensió a l'Efluent, TV_{ss} .

L'índex TV_{ss} és una mesura del percentatge del temps que l'EDAR està per sobre de la llei respecte l'abocament de SS al medi receptor. Segons la Directiva 91/271/CEE el límit d'abocament dels SS és de $35 g \cdot m^{-3}$, de manera que el temps de violació de l'índex desenvolupat serà aquell en que la planta estigui abocant per sobre d'aquest valor. Aquest índex va ser definit pel protocol Benchmark (Copp, 2002) tant pels SS_e com pels altres paràmetres d'abocament amb límit legal (DBO_5 , DQO , N_{total} i P_{total}).

Les unitats d'aquest índex són un percentatge respecte el temps total en que s'avalua el procés, i es calcula segons l'equació 4.4.

$$TV_{ss} = \frac{N_{ss}}{N_T} \cdot 100 \quad (4.4)$$

On: TV_{ss} en unitats de %

N_{ss} és el temps en que la planta no està complint el límit legal d'abocament en SS, en unitats de dies.

N_T és el temps total d'avaluació, en unitats de dies.

Si TV_{ss} és zero significa que, segons tots els registres que es tenen de SS_e , en cap moment s'ha incomplert la normativa d'abocament, per tant, quant més baix sigui el valor d'aquest índex, menys violacions es produeixen.

Aquest índex pot ser utilitzat tant en els estudis de simulació com en la validació en EDAR real, si aquesta disposa de dades en continu dels SS de l'efluent.

IV.4.4. Índex comparatiu de la Diferència del Temps de Violació del límit legal dels Sòlids en Suspensió de l'Efluent, DTV_{ss} .

L'índex de comparació DTV_{ss} indica en quin percentatge disminueix o augmenta el temps en que el procés aboca SS per sobre del límit legal respecte recircular amb un cabal constant. L'índex DTV_{ss} s'expressa en percentatge i es calcula segons l'equació 4.5.

$$DTV_{SS} = \left(\frac{TV_{SS} - TV_{SS_rec_ct}}{TV_{SS_rec_ct}} \right) \cdot 100 \quad (4.5)$$

On: DTV_{SS} en unitats de %

TV_{SS} és el temps de violació del límit legal d'abocament de SS quan s'opera amb qualsevol estratègia de recirculació externa, en unitats de dies.

$TV_{SS_rec_ct}$ és el temps de violació del límit legal d'abocament de SS quan s'opera amb recirculació externa constant, en unitats de dies.

Si l'índex DTV_{SS} és negatiu significa que hi ha una millora, una disminució del temps en que no es compleix la normativa de SS a l'efluent respecte a recircular a cabal constant. Aquest índex comparatiu es pot calcular tant en estudis de simulació com en la realitat si es té registrat en continu la concentració de SS.

IV.4.5. Índex d'avaluació del Consum de l'Energia de Bombeig del cabal de recirculació, CEB_{rec} .

Mitjançant l'índex CEB_{rec} es determina quin és el consum energètic degut al bombeig del cabal de recirculació. Aquest índex és una simplificació de l'índex 'Pumping Energy' del protocol Benchmark (Copp, 2002) i es calcula multiplicant el factor estàndard de consum energètic d'una bomba que utilitza l'índex original 'Pumping Energy', pel cabal de recirculació integrat al llarg del temps, tal i com es presenta en l'equació 4.6.

$$CEB_{rec} = \frac{0.04}{t} \int_{t_0}^t (Q_{rec}(t)) \cdot dt \quad (4.6)$$

On: CEB_{rec} en unitats de $Kw \cdot h \cdot d^{-1}$

0.04 és el consum energètic de la bomba, en unitats de $Kw \cdot h \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$

Q_{rec} és el cabal de recirculació, en unitats de $m^3 \cdot d^{-1}$.

t és el temps en que s'avalua el procés, en unitats de dies.

Quant més baix sigui el valor de CEB_{rec} menys consum d'energia, i per tant, millora del procés respecte l'optimització d'energia. Aquest índex pot ser calculat tant en estudis de simulació com en la realitat, sempre i quan es tingui registrat el cabal de recirculació o el consum de la bomba al llarg del temps.

IV.4.6. Índex comparatiu de la Diferència de Consum de l'Energia de Bombeig del cabal de recirculació, $DCEB_{rec}$.

L'índex $DCEB_{rec}$ indica en quin percentatge es consumeix més o menys energia per la recirculació respecte operar amb cabal de recirculació constant. La diferència de consum energètic s'expressa en percentatge i es calcula segons l'equació 4.7.

$$DCEB_{rec} = \left(\frac{CEB_{rec} - CEB_{rec_ct}}{CEB_{rec_ct}} \right) \cdot 100 \quad (4.7)$$

On: $DCEB_{rec}$ en unitats de %

CEB_{rec} és l'energia de bombeig del cabal de recirculació quan s'opera amb qualsevol estratègia de recirculació, en unitats de $Kw \cdot h \cdot d^{-1}$

CEB_{rec-et} és l'energia de bombeig del cabal de recirculació quan el cabal de recirculació és constant, en unitats de $Kw \cdot h \cdot d^{-1}$

Si l'índex $DCEB_{rec}$ és negatiu significa que hi ha un estalvi energètic respecte operar amb cabal de recirculació constant. Aquest índex pot ser calculat tant en estudis de simulació com en la realitat, sempre i quan es tingui registrat el cabal de recirculació al llarg del temps.

IV.4.7. Índex d'avaluació de l'Estabilitat del Decantador, CumED.

L'objectiu d'aquest índex és avaluar l'estabilitat del decantador. El punt de partida per desenvolupar aquest índex són els valors de referència d'un decantador quan es troba en una situació favorable. Aquests valors s'han obtingut a partir d'una simulació amb el model de la planta Benchmark (Copp, 2002) en estat estacionari, amb unes condicions de sedimentació òptimes del fang ($IVF = 50 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$) i un cabal d'entrada i un cabal de recirculació de $18446 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (cabal mig de l'escenari temps sec del protocol Benchmark, explicat en l'apartat III.3 del capítol Materials i Mètodes).

En la figura 4.6 s'observa com hi ha una zona superior (capes 1-4) on les concentracions són clarament més baixes. Aquestes capes corresponen a la zona de clarificació. Les cinc capes següents presenten la mateixa concentració i són englobades en la zona de sedimentació mentre que l'última capa és la que presenta la major part de la concentració de sòlids en el decantador, de manera que es defineix com la zona de compressió del fang. No obstant, es considera convenient incloure també la capa 9 com a zona de compressió, ja que és possible tenir un bon estat del decantador amb la majoria de sòlids al fons del decantador i que aquests ocupin les dues últimes capes (la 9 i la 10). En la mateixa figura també es troben calculats els percentatges de sòlids en suspensió a cada zona respecte la concentració total de fang al decantador, de manera que els percentatges de referència (condicions favorables) de la zona de clarificació, sedimentació i compressió són del 0.94%, 13.24% i 85.81% respectivament.

Núm. capa	[SS] per capa	%SS per capa*	%SS per zona
1	8.68	0.11	Zona Clarificació 0.94%
2	10.75	0.14	
3	16.18	0.20	
4	39.11	0.49	
5	262.8	3.31	Zona Sedimentació 13.24%
6	262.8	3.31	
7	262.8	3.31	
8	262.8	3.31	
9	262.8	3.31	
10	6542	82.5	Zona Compressió 85.81%

*percentatge calculat respecte la concentració total de fangs al decantador

Figura 4.6. Concentració i percentatge de sòlids en les diferents capes del decantador i percentatge de sòlids en les tres zones diferenciades respecte el total de sòlids del decantador amb la simulació de referència (quan el fang presenta un IVF de $50 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$ i el cabal de recirculació és de $18446 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)

Per desenvolupar aquest índex, es va decidir quantificar l'estabilitat del decantador comparant els percentatges obtinguts de les diferents zones respecte la situació de referència simulada. Quant més lluny es trobin els valors de la situació de referència, es considera que el decantador és menys estable.

No es dóna la mateixa importància a les tres zones diferenciades del decantador, de manera que es va decidir aplicar pesos per cadascuna d'elles. La zona que es va tenir més en compte va ser la de sedimentació (on es determina l'alçada de fang i es produeix més variabilitat, -figura 1.6-), per la qual cosa se li va atorgar un pes de 0.5. La zona de compressió també és important a l'hora d'aconseguir un decantador estable i per això se li va donar un pes de 0.35. Finalment, la zona de clarificació és la que va tenir menys pes (el 0.15 restant per sumar 1) ja que la variabilitat de concentració de sòlids en aquesta zona vindrà determinada, en gran part, per la zona de sedimentació.

D'aquesta manera es va definir el concepte d'estabilitat del decantador en un instant determinat, ED(t), respecte a les condicions inicials de referència proposades per aquest índex. Segons l'equació 4.8, ED(t) és la suma de la diferència absoluta entre el valor de percentatge de referència de cada zona i el percentatge de sòlids d'aquella mateixa zona en un instant t, normalitzada pel valor de referència i multiplicat pel pes corresponent.

$$ED(t) = a_1 \cdot \frac{|(Y_1 - X_{1,t})|}{Y_1} + a_2 \cdot \frac{|(Y_2 - X_{2,t})|}{Y_2} + a_3 \cdot \frac{|(Y_3 - X_{3,t})|}{Y_3} \quad (4.8)$$

On $X_{i,t}$ són els percentatges de sòlids en cadascuna de les tres zones del decantador (i=1,2 i 3) per a un instant t, calculats segons l'equació 4.9.

$$X_{i,t} = \frac{\sum_j V_j \cdot SST_{j,t}}{\sum_{k=1}^{10} V_k \cdot SST_{k,t}} \cdot 100 \quad (4.9)$$

On V_j correspon al volum de la capa j considerada i $SST_{j,t}$, a la concentració de SS de la capa j en un instant t. La identificació de les capes del decantador en cadascuna de les tres zones considerades (1: clarificació, 2: sedimentació i 3: compressió) s'obté a partir de la taula 4.6.

Taula 4.6. Valors dels paràmetres per calcular l'índex CumED.

Zona		Capes	Pesos	% de referència
Clarificació	i = 1	j = 1,2,3,4	a ₁ = 0.15	Y _i = 0.94
Sedimentació	i = 2	j = 5,6,7,8	a ₂ = 0.50	Y ₂ = 13.24
Compressió	i = 3	j = 9,10	a ₃ = 0.35	Y ₃ = 85.81

Per calcular ED(t) cal conèixer (equació 4.8) els valors de referència de percentatges de sòlids de cadascuna de les zones Y_i i aplicar els pesos corresponents, a_i .

Finalment, l'índex CumED proposat correspon a l'integral de la variació respecte les condicions de referència simulades al llarg del temps i s'obté a partir de l'equació 4.10.

$$CumED = \int_{t_0}^t (ED(t)) \cdot dt \quad (4.10)$$

On ED(t) és l'estabilitat del decantador, definida com la desviació respecte les condicions inicials de referència simulades en un instant determinat (t) i calculada segons l'equació 4.8.

Si CumED té un valor pròxim a zero significa que el decantador presenta una estabilitat propera a la proposada en la situació de referència de la figura 4.6. Cal tenir en compte que la definició d'aquest índex pren els percentatges de variació en valor absolut per tal d'evitar una compensació de sòlids entre cadascuna de les zones. D'aquesta manera, quant més gran sigui el valor CumED, més lluny s'estarà de les condicions de referència.

Atès que mesurar la concentració de sòlids en les diferents capes del decantador en continu de manera fiable no és una tasca senzilla (Declerq *et al.*, 2005), aquest índex només s'utilitza en els estudis de simulació.

IV.4.8. Índex comparatiu de la Diferència de l'Estabilitat del Decantador, DCumED.

Aquest índex indica en quin percentatge es diferencia l'estabilitat del decantador definida en l'índex CumED respecte a recircular amb cabal constant. La diferència de l'estabilitat del decantador (DCumED) s'expressa en percentatge i es calcula segons l'equació 4.11.

$$DCumED = \left(\frac{CumED_{rec} - CumED_{rec-ct}}{CumED_{rec-ct}} \right) \cdot 100 \quad (4.11)$$

On: DCumED en unitats de %

CumED_{rec} és l'índex d'estabilitat del decantador obtingut operant amb qualsevol estratègia de recirculació, valor adimensional.

CumED_{rec-ct} és l'índex d'estabilitat del decantador quan s'opera amb recirculació constant, valor adimensional.

Si l'índex DCumED és negatiu significa que hi ha una millora d'estabilitat del decantador amb l'estratègia de recirculació avaluada respecte operar amb cabal de recirculació constant.

IV.5. DISSENY DEL SCLD_SS

El disseny del SCLD_SS es va realitzar en tres etapes principals. Primer de tot, com en el disseny de qualsevol sistema de control, va ser necessari identificar i seleccionar les variables que havien de formar part del sistema. Per dur a terme aquesta tasca és fonamental conèixer el procés a controlar, en aquest cas, la decantació secundària, i les relacions que existeixen entre les diferents variables. Determinades les variables, es va procedir a descriure el sistema de control, que en aquest estudi, estava basat en la lògica difusa. Per tant, en un segon apartat es van definir les variables difuses del SCLD_SS, es van desenvolupar les regles 'Si-Llavors' i es va determinar el

mètode d'inferència i defuzzificació que s'havia d'utilitzar per l'execució del controlador. L'última etapa del disseny del SCLD_SS va consistir en la seva avaluació, duta a terme mitjançant dos estudis de simulació, un primer, utilitzant el protocol Benchmark (Copp, 2002) amb la planta estàndard definida per aquest protocol i un segon estudi, amb el model de l'EDAR Granollers.

IV.5.1. Identificació i selecció dels components del SCLD_SS.

El primer pas a l'hora de construir el SCLD_SS és decidir quines variables han de formar part del sistema, és a dir, identificar i seleccionar les variables mesurades, controlades i manipulades. Aquestes variables van ser escollides tant en funció de la seva influència en l'operació del decantador per aconseguir minimitzar la concentració de SS de l'efluent com de la disponibilitat de les mesures a l'EDAR Granollers.

Com s'ha explicat en el capítol de la introducció, el decantador té una doble funció (clarificació i espessiment) i lligada a aquesta doble funcionalitat s'identifiquen els principals paràmetres relacionats amb la seva operació. Aquests paràmetres s'engloben principalment en dos grups, els associats amb les condicions hidràuliques i els associats amb les condicions de sedimentació del fang. En unes altres paraules, es pot dir que el funcionament dels decantadors secundaris com a clarificadors està fortament relacionat amb la càrrega hidràulica que pot suportar el decantador, determinada pel cabal d'entrada al decantador i que el funcionament dels decantadors com a espessidors dels fangs ve determinat per les condicions de sedimentació i compressió del fang així com per la seva concentració. No obstant, és important destacar que, en últim terme, les dues funcions d'un decantador no són independents sinó que estan interrelacionades, de manera que, per exemple, si es produeixen problemes en la zona d'espessiment, en conseqüència acabarà havent-hi problemes en la clarificació. És per això, que es van utilitzar variables d'ambdues vessants.

El cabal d'entrada del decantador i el cabal de recirculació són les variables relacionades amb la hidràulica del decantador secundari de l'EDAR Granollers. En aquest cas, no es considera el cabal de purga, ja que aquesta operació es duu a terme des del reactor biològic. El cabal de recirculació (Q_{rec}) i el cabal d'entrada són dos factors operacionals clau pel bon funcionament d'un decantador (Tsai *et al.*, 1996) i per tant, per obtenir un sobrenedant clar, sense SS a l'efluent. El Q_{rec} té un efecte directe en la dinàmica del decantador a més de poder ser modificat fàcilment en l'EDAR Granollers. Per tot això, aquesta variable va ser definida com la variable manipulada del SCLD_SS i per tant, l'acció de control a executar en el procés.

El cabal d'entrada al decantador és determinat pel cabal de recirculació més el cabal d'entrada al reactor biològic, i com ja s'ha dit, juga un paper molt important en l'eficiència del procés de clarificació del decantador: si el cabal que entra al decantador és molt elevat, es pot produir un xoc hidràulic que comporti un rentat de fangs cap a medi receptor. Per tant, cal tenir en compte el cabal d'entrada al reactor (Q_{en}) a l'hora de determinar el cabal a recircular. Aquesta relació entre els dos cabals va comportar que es decidís escollir el Q_{en} com a variable mesurada del nostre sistema de control, tenint en compte que a l'EDAR Granollers, el seu valor es troba monitoritzat en temps real.

Per l'altra banda, també és fonamental conèixer les condicions de sedimentació del fang activat. Com s'ha explicat en el capítol d'introducció, les mesures més utilitzades per quantificar les característiques de sedimentació del fang són l'IVF, la velocitat zonal de sedimentació i l'alçada de fangs. Si l'alçada de fangs hagués estat monitoritzada a temps real en l'EDAR Granollers, aquesta hauria estat la variable escollida. Degut a que aquest paràmetre es mesura manualment (figura 4.7) i puntualment en l'EDAR, fou descartat com una de les variables mesurades del SCLD_SS. Com a conseqüència, és va optar per seleccionar l'IVF com la segona variable mesurada del sistema de control, amb l'objectiu d'utilitzar-se com una mesura indicadora de les condicions de sedimentació del fang.



Figura 4.7. Mesura manual de l'alçada de fang en el decantador secundari de l'EDAR Granollers.

Encara que, a l'EDAR Granollers, l'IVF també sigui un valor que s'analitzi en discontinu un cop al dia, la seva variabilitat, exceptuant casos puntuals, no és horària sinó diària, de manera que no tenir valors en continu d'aquesta variable no va ser considerat un requisit fonamental a l'hora de seleccionar aquest paràmetre pel sistema de control a dissenyar. La figura 4.8 mostra la representació gràfica de l'evolució diària de l'IVF en l'EDAR Granollers durant l'any 2004, on s'observa que, en general, els valors d'IVF no varien dràsticament d'un dia per un altre, sinó que presenten una evolució més lenta, marcada amb una línia vermella.

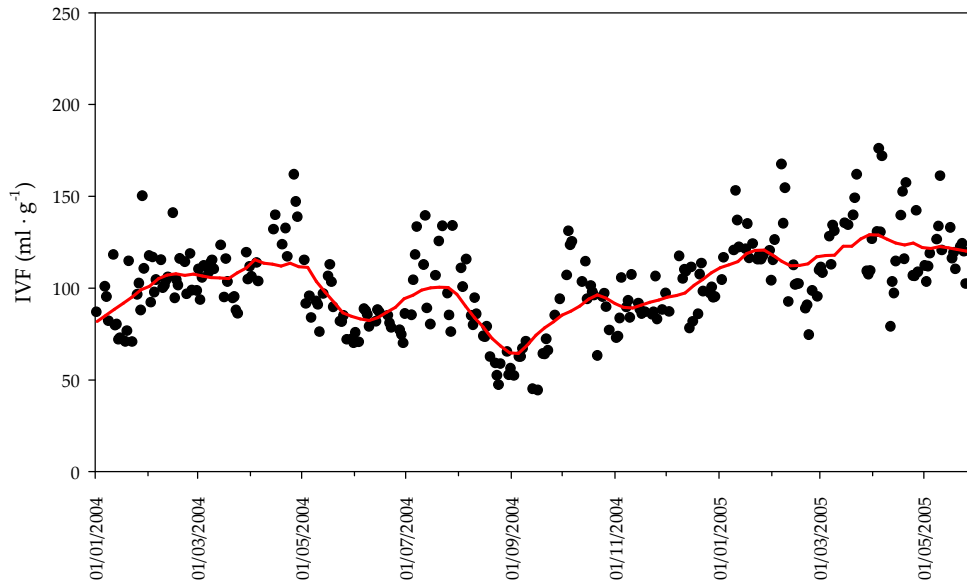


Figura 4.8. Gràfic amb l'evolució de l'IVF durant l'any 2004 fins el juny del 2005.

La taula 4.7 presenta les variables del SCLD_SS. En resum, aquest sistema de control va quedar definit amb dues variables mesurades, el Qen per tenir en compte la hidràulica del decantador i l'IVF per indicar les condicions de sedimentació del fang. El Qrec va ser escollit com la variable manipulada en funció dels valors de Qen i IVF amb l'objectiu de controlar els SS de l'efluent (la variable controlada).

Taula 4.7. Variables seleccionades per formar part del SCLD_SS.

Paràmetres del SCLD_SS	
Variable controlada	Sòlids en suspensió efluent (SSe)
Variables mesurades	Cabal entrada biològic (Qen)
	Índex Volumètric de Fangs (IVF)
Variable manipulada	Cabal de recirculació externa (Qrec)

IV.5.2. Descripció dels components i operadors del SCLD_SS

Identificades i seleccionades les variables del sistema de control, la figura 4.9 presenta l'estructura resultant del SCLD_SS que s'explica en aquest capítol. Amb aquest sistema de control es determina quin és el cabal de fangs a recircular en funció del cabal d'entrada al reactor biològic (Qen) i l'IVF. Els valors obtinguts del procés de les dues variables d'entrada són fuzzificats per obtenir els respectius valors lingüístics. A continuació, mitjançant el procés d'inferència i en funció de la base de regles prèviament definida s'obté un valor lingüístic de sortida que cal defuzzificar per aconseguir l'acció de control desitjada, que en aquest cas és el valor de cabal de recirculació.

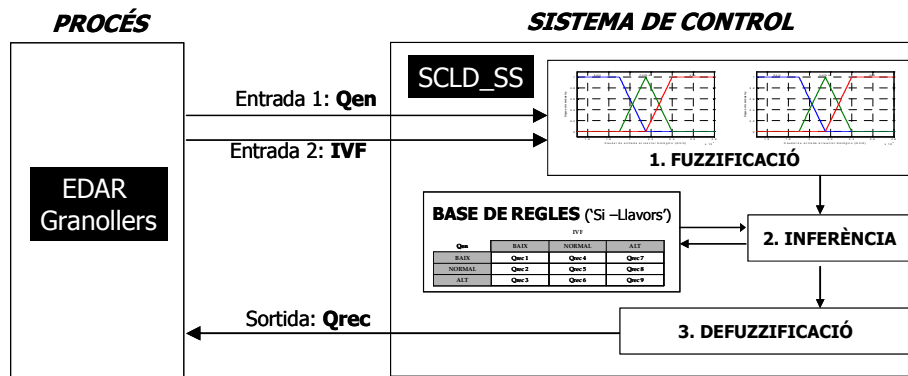


Figura 4.9. Estructura del SCLD_SS.

Per construir el SCLD_SS, representat a la figura 4.9, és necessari seguir quatre passos bàsics:

- Definició de les variables
- Construcció de les regles 'Si - Llavors'
- Selecció d'operadors
- Elecció del mètode de defuzzificació

Com s'explica detalladament en l'apartat III.1 del capítol de materials i mètodes, la definició de les variables és la transformació de les variables d'entrada i sortida en variables difuses, és a dir, cal definir-les mitjançant etiquetes lingüístiques i funcions de pertinença. La construcció de les regles 'Si-Llavors' dona com a resultat la matriu de decisió on s'introdueix el coneixement necessari per a que el SCLD_SS funcioni correctament. Les diverses opcions d'operadors per la composició dels antecedents i el procés d'inferència (implicació i agregació) estan explicats detalladament en els apartats I.2.4.8 i I.2.4.9 del capítol I de la introducció. Per la construcció del SCLD_SS es va utilitzar la conjunció I amb l'operador mínim de Zadeh (Zadeh, 1973) per a la composició i la inferència es va dur a terme pel mètode MIN-MAX de Mamdani, on s'utilitza el mínim per la implicació i el màxim per l'agregació, (Mamdani, 1975). Per la defuzzificació es va escollir el mètode centroide (equació 1.15 de l'apartat I.2.4.10 del capítol I). Aquest és un dels mètodes més àmpliament utilitzats en SCLD, per la seva facilitat de càlcul sense que sigui en detriment del correcte funcionament del sistema (Cox, 1999). En l'apartat I.2.4.10 del capítol I, s'expliquen amb detall els principals mètodes de defuzzificació existents.

IV.5.2.1. Definició de les variables difuses del SCLD_SS

Definir les variables significa especificar l'univers de discurs, el límit de valors de les dues variables d'entrada i de la variable de sortida, així com definir els conjunts difusos per a cadascuna d'elles. És a dir, especificar nombre i tipus de funcions de pertinença, partició de l'univers de discurs en les funcions definides, grau de solapament entre les diferents funcions i simetria de cadascuna d'elles (en l'apartat III.1 del capítol de materials i mètodes s'explica detalladament tot aquest procés).

Es van definir tres conjunts difusos per cadascuna de les variables del SCLD_SS, les etiquetes lingüístiques dels quals foren: 'Baix', 'Normal' i 'Alt'. Aquestes etiquetes van ser representades per diferents funcions de pertinença

segons la variable que definien (Qen, IVF o Qrec). Per l'elecció d'aquests tres conjunts difusos es van seguir dos principis bàsics:

- Partint sempre de la base d'intentar construir el sistema d'una manera senzilla i pràctica, es determinen el mínim d'etiquetes lingüístiques que defineixen d'una manera completa les variables IVF, Qen i Qrec, sense que es perjudiqui la seva comprensió en el sistema de control. Segons Heske i Heske (1999), la traducció de l'experiència humana en els conjunts difusos resulta entre dues i set funcions de pertinença, amb l'objectiu de no utilitzar més funcions de les realment necessàries.
- Simplificar els nombre de conjunts difusos en la definició de variables comporta una minimització de les regles 'Si-Llavors' a elaborar, de manera que es va decidir utilitzar el mínim de regles imprescindibles per incloure tot el coneixement necessari per a realitzar un bon control a la vegada que es simplificava el càlcul a realitzar.

En últim terme, la definició dels conjunts difusos es va realitzar en base al coneixement expert i teòric, de manera que en aquest cas, es va considerar suficient tractar les variables de cabals i d'IVF com a valors difusos 'Baixos', 'Normals' o 'Alts'.

La partició de l'univers de discurs de cada variable en els tres conjunts difusos anomenats per les tres etiquetes lingüístiques es va dur a terme de la següent manera:

1. Els conjunts difusos van ser caracteritzats mitjançant funcions de pertinença de tipus triangular i pseudo-trapezoïdal als extrems (equacions 1.6 i 1.7 de l'apartat I.2.4.7 del capítol I) per cadascuna de les variables. S'escolliren aquest tipus de funcions per la seva simplicitat de càlcul, sense que això comportés una disminució de la fiabilitat del sistema (Cox, 1999).
2. Les funcions de pertinença van ser distribuïdes a intervals regulars i els seus límits van ser fixats de manera que el solapament entre les diferents etiquetes fos sempre del 50% a la vegada que la funció triangular fos sempre simètrica. Un grau de solapament del 50% proporciona un bon ajustament i assegura una resposta amb canvis no abruptes (Adroer *et al.*, 1999).

Les figura 4.10 representa gràficament el model de partició de l'univers de discurs, funcions de pertinença, simetries i solapament per les tres variables del SCLD_SS.

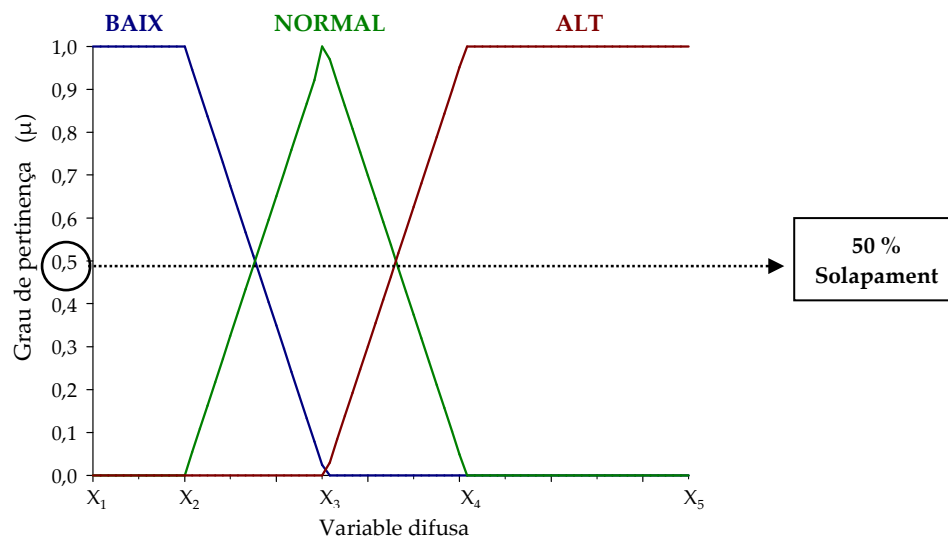


Figura 4.10. Model de definició de les funcions de pertinença per les variables difuses del SCLD_SS.

Segons aquesta figura 4.10, el suport de la funció de pertinença pseudo-trapezoïdal per l'etiqueta 'Baix' és l'interval $[X_1, X_3]$, el suport de la funció de pertinença triangular per l'etiqueta 'Normal' és l'interval (X_2, X_4) i el suport de la funció de pertinença pseudo-trapezoïdal per l'etiqueta 'Alt' és l'interval $(X_3, X_5]$. Els valors de X_n varien segons la variable difusa que es defineixi.

Variable d'Entrada 1: Qen

Els rangs dels valors del cabal d'entrada varien segons l'EDAR o model de simulació objecte d'estudi. Al llarg d'aquest capítol, els valors de cabal varien segons si es treballa amb el model de la planta Benchmark (Copp, 2002) o amb el model de l'EDAR Granollers o amb l'EDAR Granollers real. És per això que en aquest apartat, no es defineixen els valors dels rangs de les tres funcions de pertinença del cabal d'entrada, sinó que s'explica quina va ser la metodologia utilitzada per fer la partició de l'univers de discurs d'aquesta variable.

- Rang del conjunt difús 'Alt': el 12,5 % dels valors més grans de cabal d'entrada de tot el període estudiat es van considerar dins el conjunt difús 'Alt' amb un grau de certesa del 100%. Per tant, el punt X_4 del gràfic de la figura 4.10, correspon al valor a partir del qual el 12,5% dels valors de cabal d'entrada són totalment 'Alts'.
- Rang del conjunt difús 'Baix': el 12,5 % dels valors més petits de cabal d'entrada de tot el període estudiat, es van considerar dins el conjunt difús 'Baix' amb un grau de certesa del 100%. Per tant, el punt X_2 del gràfic de la figura 4.10, correspon al valor fins el qual, el 12,5% dels valors de cabal d'entrada són totalment 'Baixos'.
- Rang del conjunt difús 'Normal': el 75% dels valors de cabal d'entrada restants, formen el rang del conjunt difús 'Normal', i el valor del mig del rang és el vèrtex del triangle, el valor amb un grau de certesa del 100%, que en la figura 4.10 correspon al punt X_3 .

Aquesta metodologia de partició del cabal d'entrada va ser aplicada en els estudis de simulacions, quan es coneixen per anticipat els valors de cabal d'entrada amb els quals es simularà. En situacions reals va ser necessària una aproximació en base a les dades històriques i l'experiència de qui opera l'EDAR.

Variable d'Entrada 2: IVF

La determinació dels punts que defineixen les funcions de pertinença 'Baix', 'Normal' i 'Alt' de la variable difusa IVF es va fonamentar en tres valors d'IVF que indiquessin les tres situacions bàsiques de sedimentació del fang: òptima, correcta i dolenta. En els estudis de simulació i en la implementació real del SCLD_SS es va utilitzar la mateixa definició de la variable IVF, duta a terme a partir de la teoria sobre tipus de fang segons els valors d'IVF (Jenkins, 2003; Wanner, 1994) i de valors històrics d'IVF de l'EDAR Granollers.

- El valor d'IVF indicatiu d'una condició de sedimentació del fang òptima va ser definit com el valor d'IVF Baix amb un grau de certesa del 100%, és a dir el punt X_2 de la figura 4.10, que en aquest treball va tenir un valor de $50 \text{ ml}\cdot\text{g}^{-1}$. Per tant, es va determinar que valors per sota de $50 \text{ ml}\cdot\text{g}^{-1}$ fossin considerats totalment 'Baixos'. És important fer un petit incís en la condició d'IVF 'Baix': el fenomen de desfloculació del fang presenta valors d'IVF 'Baixos' i comporta problemes de separació del fang. Aquest fenomen no va ser contemplat en el SCLD_SS de manera que si existeix desfloculació del fang (Comas *et al.*, 2003), cal desactivar el sistema de control i actuar de manera manual fins solucionar el problema.
- El valor d'IVF indicatiu d'una condició de sedimentació del fang dolenta va ser definit com el punt X_4 , amb un valor de $150 \text{ ml}\cdot\text{g}^{-1}$ en els estudis que es presenten. És a dir, es va decidir que a partir de $150 \text{ ml}\cdot\text{g}^{-1}$ d'IVF, podien aparèixer problemes de separació del fang.
- El punts X_2 i X_4 defineixen el rang de valors del conjunt 'Normal'. El punt mig d'aquest rang va ser determinat com el valor d'IVF que indicava una condició de sedimentació del fang 'Normal' amb un grau de certesa del 100%. En els estudis d'aquest capítol, es va determinar que aquest valor fos de $100 \text{ ml}\cdot\text{g}^{-1}$.

En resum, els valors d'IVF 'Baix' signifiquen que les condicions de sedimentació del fang són òptimes, amb l'excepcionalitat de fenòmens de desfloculació. Els valors d'IVF 'Normal' són valors amb els quals el fang presenta una condició de sedimentació correcta, sense que existeixin problemes de separació en la instal·lació. Per acabar, el valor d'IVF a partir del qual es considera que és completament 'Alt', és aquell valor a partir del qual el fang presenta condicions de sedimentació dolentes.

En la taula 4.8 s'enumeren les funcions de pertinença i el suport de cadascuna d'elles per definir la variable d'entrada difusa IVF.

Taula 4.8. Definició de les funcions de pertinença de la variable d'entrada difusa IVF .

IVF	Suport (ml · g ⁻¹)	Funció de pertinença
BAIX	[0, 100)	Funció pseudotrapezoïdal
NORMAL	(50, 150)	Funció triangular
ALT	(100, 250]	Funció pseudotrapezoïdal

En la figura 4.11 es troben representades gràficament les tres funcions de pertinença que defineixen la variable difusa IVF.

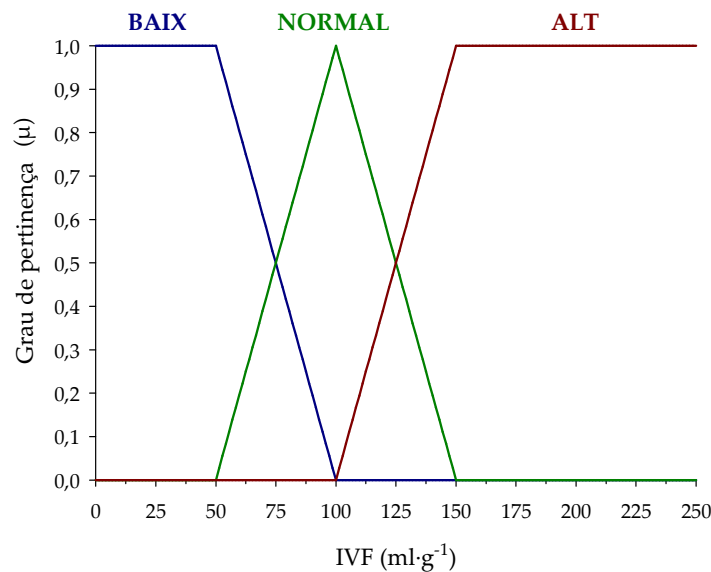


Figura 4.11. Representació gràfica de les funcions de pertinença de la variable d'entrada difusa IVF.

Variable de Sortida: Qrec

A diferència del cabal d'entrada, la variable Qrec no va ser definida amb unitats de cabal (m³·d⁻¹) sinó amb percentatges respecte el cabal màxim de recirculació. D'aquesta manera, mentre la definició de les etiquetes 'Baix', 'Normal' i 'Alt' va ser sempre la mateixa, els valors de cabal variaven segons si es treballava amb el model de la planta Benchmark (on es determinà un cabal màxim de recirculació de 32000 m³·d⁻¹) o amb l'EDAR Granollers (on el cabal de recirculació màxim real que es pot bombejar és de 28800 m³·d⁻¹).

Degut a que a l'EDAR Granollers es recirculava de manera constant amb un cabal fixat al 50% del cabal màxim que es podia bombejar, es va decidir definir aquest valor com a valor 'Normal', de manera que el punt X₃ del gràfic de la figura 4.10 va ser fixat com el 50% de Qrec màxim. A continuació, per tal que la distància entre els màxims de les tres funcions de pertinença fos la mateixa, es va decidir que el punt X₂ fos el 25% del cabal màxim de recirculació i el punt X₄ fos el 75% a la vegada que es va definir una funció triangular simètrica pel conjunt difús 'Normal'. La taula 4.9 presenta els suports per cada funció de pertinença que defineixen la variable de sortida difusa Qrec.

Taula 4.9. Definició de les funcions de pertinença de la variable de sortida difusa Qrec.

Qrec	Suport (%)	Funció de pertinença
BAIX	[0, 50]	Funció pseudotrapezoïdal
NORMAL	(25, 75)	Funció triangular
ALT	(50, 100]	Funció pseudotrapezoïdal

En la figura 4.12 es troben representades gràficament les tres funcions de pertinença que defineixen la variable difusa Qrec.

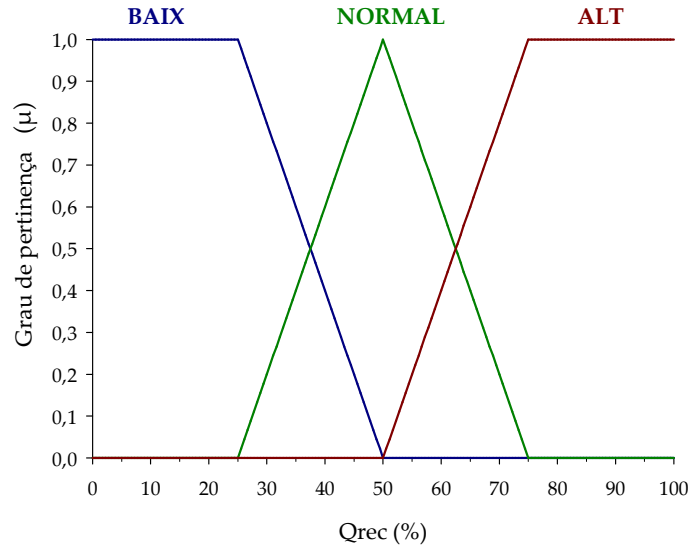


Figura 4.12. Representació gràfica de les funcions de pertinença de la variable de sortida difusa Qrec.

IV.5.2.2. Desenvolupament de les regles ‘Si – Llavors’

La base de regles ‘Si-Llavors’, també anomenada matriu de decisió, està constituïda per 9 regles, tal i com es mostra en la taula 4.10. La base del coneixement per determinar la matriu de decisió es pot obtenir de diferents fonts. En aquest cas, les regles van ser definides en base al coneixement expert (mitjançant entrevistes amb el cap de planta de l'EDAR Granollers) i teòric (explicat en detall en l'apartat I.1.2.2).

Taula 4.10. Model que segueix la base de regles o matriu de decisió del SCLD_SS.

Qen \ IVF	BAIX	NORMAL	ALT
BAIX	Qrec 1	Qrec 4	Qrec 7
NORMAL	Qrec 2	Qrec 5	Qrec 8
ALT	Qrec 3	Qrec 6	Qrec 9

L'estructura de les regles és del tipus:

*SI IVF és “Baix” I Qen és “Baix” LLAVORS Qrec és “Qrec 1”
on Qrec1 pot ser ‘Baix’, ‘Normal’ o ‘Alt’*

Per tant, hi ha tres possibilitats de definició per cada regla i consegüentment, des d'un punt de vista de combinatòria, 19683 (3⁹) opcions diferents de matrius de decisió. No obstant, només es van considerar aquelles actuacions candidates a assolir els objectius marcats en l'inici de l'estudi: millora de la qualitat de l'efluent respecte els SS, estalvi energètic del bombeig de la recirculació i estabilitat del decantador secundari de l'EDAR Granollers.

El desenvolupament de la matriu es va dur a terme intentant aconseguir una variació gradual entre regles consecutives per poder obtenir una superfície de control contínua i suau. La definició de les regles 'Si-Llavors' va ser realitzada en base a dues tendències generals de recirculació: directament proporcional al cabal d'entrada o inversament proporcional al cabal d'entrada. Aquestes dues tendències tenen objectius diferents: mantenir la relació F:M en el reactor i mantenir la càrrega hidràulica al decantador. Mentre que amb un control convencional només es pot optar per una tendència, amb un sol sistema de control basat en lògica difusa es pot recircular prioritant un o altre objectiu segons la situació en la qual ens trobem (Tsai *et al.*, 1996). A partir de les dues tendències oposades de recirculació, es van definir sis matrius de decisió més, tenint en compte les següents normes:

1. Amb l'objectiu de simplificar i limitar el nombre de matrius de decisió diferents a desenvolupar, es va determinar que en la situació de normalitat de sedimentació del fang en el decantador (IVF 'Normal') les opcions de recirculació només serien dues: directament o inversament proporcional al cabal d'entrada. Per tant les regles 4, 5 i 6 només podien ser de dues maneres, tal i com es mostra en la figura 4.13.

Qen \ IVF	NORMAL
BAIX	4. Baix
NORMAL	5. Normal
ALT	6. Alt

Qen \ IVF	NORMAL
BAIX	4. Alt
NORMAL	5. Normal
ALT	6. Baix

Figura 4.13. Opcions de recirculació quan la sedimentació del fang és 'Normal' (IVF Normal): (a) en el mateix sentit que la variació del cabal d'entrada, directament proporcional i (b) en el sentit contrari, inversament proporcional.

2. Amb l'objectiu d'aconseguir una superfície suau i contínua de control, es va decidir no fer salts grans de cabal de recirculació en el sentit vertical de la matriu, com per exemple, passar d'una recirculació 'Alta' a 'Baixa' sense tenir en compte el pas de recirculació 'Normal'. L'exemple de la figura 4.14 mostra una situació brusca i incorrecta amb un salt de cabal en l'apartat (a) i una situació correcta de variació de cabal de recirculació en l'apartat (b).

Qen \ IVF	NORMAL
BAIX	1. Baix
NORMAL	2. Baix
ALT	3. Alt

Qen \ IVF	NORMAL
BAIX	1. Baix
NORMAL	2. Baix
ALT	3. Normal

Figura 4.14. Exemple de definició de regles, (a) erroni i (b) correcte segons la norma 2.

- Es va permetre salts grans de cabal de recirculació en sentit horitzontal, és a dir entre canvis d'IVF. El fet que es permetessin fer canvis més bruscos en sentit horitzontal (variació d'IVF) que no en vertical (variació cabal d'entrada) fou degut a que el cabal d'entrada en l'EDAR Granollers te una dinàmica més ràpida en el temps que no pas l'IVF.

La taula 4.11 resumeix els vuit SCLD_SS que es van dissenyar en funció de l'obtenció de vuit matrius de decisió diferents. En sis de les alternatives es tendeix (amb més o menys matisos determinats pels valors d'IVF) a recircular directa o inversament proporcional al cabal d'entrada i en dues (SCLD_SS5 i SCLD_SS7) es barregen les dues tendències en la mateixa matriu de decisió.

Taula 4.11. Resum de les vuit matrius de decisió que van donar lloc a vuit opcions de SCLD_SS.

SCLD_SS	Tendència general de la matriu de decisió
SCLD_SS1	Imitació de l'estratègia de recircular directament proporcional al Qen
SCLD_SS2	Imitació de l'estratègia de recircular inversament proporcional al Qen
SCLD_SS3	Matisació de SCLD_SS1 en situació d'IVF baix i alt
SCLD_SS4	Matisació de SCLD_SS2 en situació d'IVF baix i alt
SCLD_SS5	Barreja dels dos conceptes (directament / inversament prop al Qen) segons IVF
SCLD_SS6	Matisació de SCLD_SS5 en situació d'IVF alt
SCLD_SS7	Barreja dels dos conceptes (directament / inversament prop al Qen) segons IVF
SCLD_SS8	Matisació de SCLD_SS7 en situació d'IVF alt

SCLD_SS1

La primera matriu de decisió (taula 4.12) va ser definida amb l'objectiu de treballar amb una recirculació proporcional al cabal d'entrada, fos quina fos la capacitat de sedimentació del fang, (indicada pels valors d'IVF), de manera que, per exemple, si el cabal d'entrada és alt, es recircula un cabal alt. L'objectiu d'aquesta matriu és recircular de manera similar a la pràctica habitual en moltes EDAR, que tenen com a finalitat mantenir la relació F:M del reactor sense grans variacions.

Taula 4.12. Base de regles del SCLD_SS1

Qen \ IVF	BAIX	NORMAL	ALT
BAIX	1. Baix	4. Baix	7. Baix
NORMAL	2. Normal	5. Normal	8. Normal
ALT	3. Alt	6. Alt	9. Alt

La diferència d'utilitzar un sistema de control basat en lògica difusa en lloc d'un controlador convencional per aquesta estratègia es mostra en la figura 4.15 (a). En el gràfic d'aquesta figura, on es presenta un exemple de la relació entre el cabal d'entrada i el cabal de recirculació segons SCLD_SS1, s'observa que en lloc de tenir una funció lineal amb el mateix pendent, on la proporcionalitat sempre es manté, s'obté una funció amb diferents pendents i amb els extrems constants. Al treballar amb lògica difusa, no es pot parlar d'una recirculació proporcional al cabal d'entrada amb un percentatge discret. Aquest dependrà del grau de certesa del valor d'IVF, del valor de Qen i de la definició de l'univers de discurs de cadascun d'ells. El mateix cas succeeix (figura 4.15 (b)), però a la inversa, en analitzar el comportament de la matriu de decisió del SCLD_SS2.

SCLD_SS2

La segona matriu de decisió va ser definida amb l'objectiu de recircular inversament proporcional al cabal d'entrada per mantenir la càrrega hidràulica al decantador, sense tenir en compte les condicions de sedimentació del fang. Amb aquesta estratègia es buscava evitar variacions brusques de cabal a l'entrada del decantador que poguessin pertorbar la sedimentació del fang. Si entra un cabal elevat es recircula el mínim de cabal per tal de proporcionar més temps al fang per decantar. Si entra un cabal baix, es recircula el màxim de cabal per aprofitar la situació d'entrada de poca càrrega per buidar de fang el decantador. La matriu definida es mostra en la taula 4.13.

Taula 4.13. Base de regles del SCLD_SS2

Qen \ IVF	BAIX	NORMAL	ALT
BAIX	1. Alt	4. Alt	7. Alt
NORMAL	2. Normal	5. Normal	8. Normal
ALT	3. Baix	6. Baix	9. Baix

La figura 4.15 (b) presenta un exemple de la relació entre el cabal de recirculació i cabal d'entrada determinada per la matriu del SCLD_SS2.

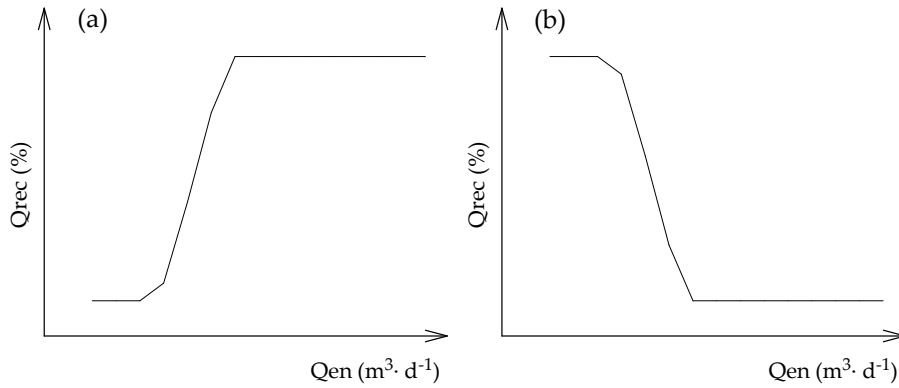


Figura 4.15. Relació entre el cabal de recirculació i el cabal d'entrada en (a) SCLD_SS1 i (b) SCLD_SS2

Les dues matrius següents, SCLD_SS3 i SCLD_SS4, són matisacions de les matrius SCLD_SS1 i SCLD_SS2 mantenint la tendència global de recircular directament proporcional al cabal d'entrada i inversament proporcional al cabal d'entrada respectivament. Els matisos van ser introduïts en les columnes d'IVF 'Baix' i 'Alt' ja que, seguint les normes explicades prèviament, la columna d'IVF 'Normal' només té dues possibilitats (directament o inversament proporcional sense matisos).

SCLD_SS3

Globalment, les accions de recirculació (taula 4.14) a efectuar segons les diferents regles proposades en el SCLD_SS3, proporcionen una transició suau a la superfície de control. En aquesta matriu no hi ha cap salt de cabal de recirculació entre regles consecutives, ni en sentit vertical ni en horitzontal. Hi ha una gradació vertical suau des de recircular poc a recircular molt i amb una recirculació normal en la diagonal (regles 3, 5 i 7).

Taula 4.14. Base de regles del SCLD_SS3

Qen \ IVF	BAIX	NORMAL	ALT
BAIX	1. Baix	4. Baix	7. Normal
NORMAL	2. Baix	5. Normal	8. Normal
ALT	3. Normal	6. Alt	9. Alt

- Situació IVF baix (bona sedimentació del fang): si el fang sedimenta bé, el decantador té més capacitat per suportar més quantitat de sòlid. Per tant, si el cabal és baix, es recircula poc ja que no és prioritari treure sòlids (l'alçada de fang és baixa). Si el cabal és normal, es continua recirculant poc ja que el decantador pot suportar la concentració de fangs que s'acumula. Si el cabal és alt s'augmenta la recirculació a valors definits com a normals, per tal de mantenir la concentració de sòlids al reactor minimitzant sempre el cabal a recircular segons l'estat del decantador. A l'estar en una situació favorable (condicions de sedimentació del fang òptimes), aquestes tres primeres regles són escollides amb l'objectiu de minimitzar el consum energètic

per bombeig de la recirculació alhora que es pretén estar a punt per possibles problemes posteriors, utilitzant el decantador secundari com a magatzem del fang activat.

- Situació IVF normal: el cabal de recirculació de fangs és directament proporcional al cabal d'entrada al reactor per mantenir la relació F:M al reactor.
- Situació IVF alt (sedimentació del fang dolenta, proliferació de filamentosos): si el fang del decantador no sedimenta correctament, i per tant, es corre el risc de tenir una alçada de fang elevada i problemes de separació, s'opta per intentar no acumular molt de fang al decantador. Amb aquest objectiu, es recircula 'Normal' quan el cabal d'entrada es 'Baix' i 'Normal'. Quan el cabal d'entrada és elevat s'opta per recircular al màxim per evitar l'acumulació de fang al decantador encara que hi hagi el risc d'un xoc hidràulic.

La figura 4.16 presenta un exemple de la superfície de control que s'obté de la matriu SCLD_SS3 amb la definició del cabal d'entrada, IVF i cabal de recirculació de l'EDAR real de Granollers.

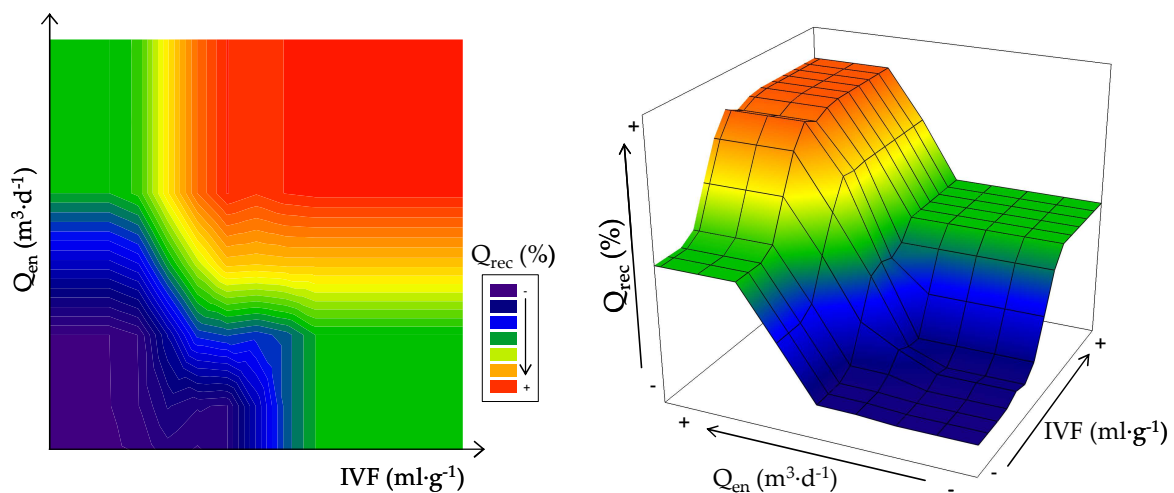


Figura 4.16. Exemple de superfície de control obtinguda amb la matriu de decisió del SCLD_SS3.

El valor de cabal de recirculació va augmentant en funció de la gradació de colors que es mostra en la llegenda, des de tonalitats blaves, corresponents a recirculacions baixes fins a tonalitats vermelles que corresponen a recirculacions elevades. El color verd representa un cabal de recirculació definit com a 'Normal'. En aquesta figura s'observa una superfície suau sense canvis bruscos amb diferents pendents però amb el mateix sentit que el SCLD_SS1 (figura 4.15 (a)): a mesura que incrementa el cabal d'entrada, també augmenta el cabal de recirculació. La gradació de colors és contínua i en diagonal, des de tonalitats blavoses en l'origen fins a tonalitats vermelloses a l'altre extrem.

SCLD_SS4

Les accions de recirculació proposades pel SCLD_SS4 (taula 4.15) proporcionen també una transició suau a la superfície de control però en el sentit contrari que l'opció anterior. A l'igual que SCLD_SS3, també hi ha una gradació vertical suau, però es diferencia en que el sentit és a la inversa: es va des de recircular molt a recircular poc. La recirculació 'Normal' es continua mantenint en la diagonal (regles 3, 5 i 7). En aquesta matriu tampoc hi ha cap salt bruscat de cabal de recirculació entre regles consecutives, ni en sentit vertical ni en horitzontal.

Taula 4.15. Base de regles del SCLD_SS4

Qen \ IVF	BAIX	NORMAL	ALT
BAIX ↓	1. Alt ↑	4. Alt ↑	7. Normal ↑
NORMAL ↓	2. Alt ↑	5. Normal ↑	8. Baix ↑
ALT ↓	3. Normal ↑	6. Baix ↑	9. Baix ↑

- Situació IVF baix (bona sedimentació del fang): amb aquesta matriu de decisió s'opta per recircular al màxim quan el cabal és 'Baix' i 'Normal' de manera que s'aprofita la correcta sedimentació del fang per no acumular-lo al decantador i deixar-lo preparat per situacions adverses. Quan el cabal d'entrada és 'Alt', es disminueix la recirculació a 'Normal' per evitar un excés de cabal d'entrada al decantador que pogués produir un xoc hidràulic.
- Situació IVF normal: el cabal de recirculació de fangs és inversament proporcional al cabal d'entrada a reactor amb l'objectiu de prevenir un xoc hidràulic.
- Situació IVF alt (sedimentació del fang dolenta, proliferació de filamentoses): tenir valors d'IVF elevats significa que l'alçada del llit de fangs al decantador pot ser alta i perillosa, de manera que caldrà evitar xocs hidràulics i de càrrega. Per tant, quan el cabal d'entrada és 'Baix', s'aprofita per recircular una mica més que el cabal d'entrada (Qrec 'Normal') amb l'objectiu de baixar l'alçada de fangs. Si el cabal d'entrada és 'Normal', per tal d'evitar un xoc hidràulic i una posterior rentada de fangs del decantador, es proposa recircular el mínim (Qrec 'Baix'). Si el cabal d'entrada és 'Alt', és continua recirculant el mínim (Qrec 'Baix') per evitar un rentat de fangs del decantador per una entrada de cabal elevat, quan les condicions de sedimentació del fang són dolentes.

La figura 4.17 presenta un exemple de la superfície de control que s'obté de la matriu SCLD_SS4 amb la definició del cabal d'entrada, IVF i cabal de recirculació de l'EDAR real de Granollers.

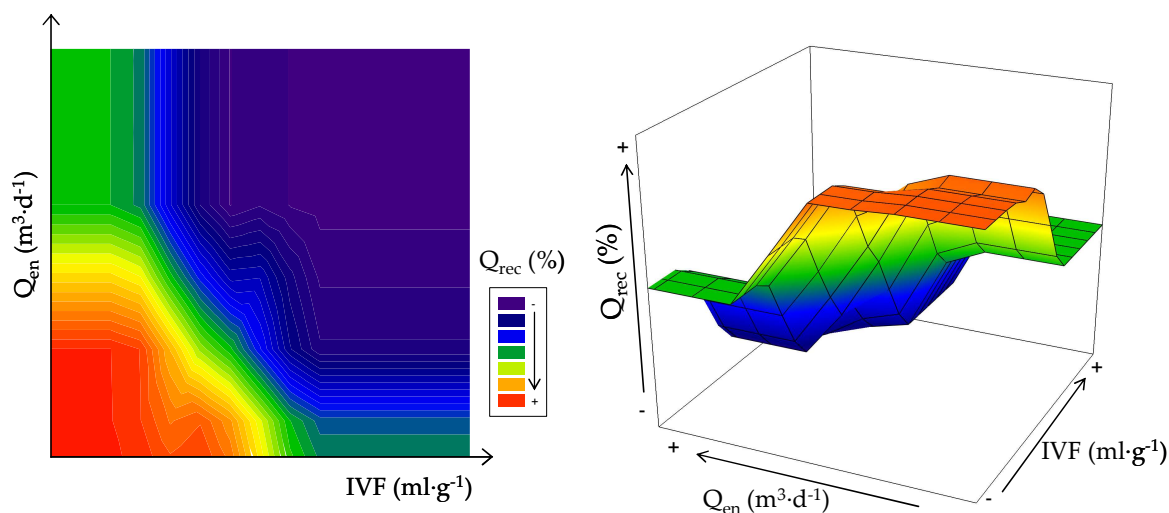


Figura 4.17. Exemple de superfície de control obtinguda amb la matriu de decisió del SCLD_SS4.

El valor de cabal de recirculació va augmentant en funció de la gradació de colors que es mostra en la llegenda, des de tonalitats blaves, corresponents a recirculacions baixes fins a tonalitats vermelles que corresponen a recirculacions elevades. El color verd representa un cabal de recirculació definit com a 'Normal'. En aquesta cas, s'observa una superfície suau, sense canvis bruscos, amb diferents pendents però en el mateix sentit que el SCLD_SS2 (figura 4.15 (b)) i al contrari que SCLD_SS3 (figura 4.16): a mesura que incrementa el cabal d'entrada, el cabal de recirculació disminueix. La gradació de colors és contínua i en diagonal, però a diferència de SCLD_SS3 va des de tonalitats vermelloses en l'origen fins a tonalitats blavoses

Després d'haver dissenyat quatre matrius tenint sempre en compte seguir una o altra tendència de recirculació en el global de la matriu, es van desenvolupar quatre matrius més amb la possibilitat d'introduir els dos conceptes antagònics en la mateixa base de regles. Gràcies a la utilització de la lògica difusa, es poden incloure dues estratègies diferents en el mateix controlador, com per exemple, recircular directament proporcional al cabal d'entrada si les condicions de sedimentació del fang al decantador són bones i recircular inversament proporcional al cabal d'entrada si les condicions de sedimentació del fang són dolentes.

SCLD_SS5

La matriu de decisió d'aquest sistema de control es presenta en la taula 4.16. En aquest cas, la tendència de recirculació varia segons la situació de sedimentació del fang. Es segueix una tendència de recirculació directament proporcional al cabal d'entrada si l'IVF és 'Baix' o 'Normal' i es recircula de forma inversa si l'IVF és 'Alt'.

Aquesta matriu presenta una transició suau en gairebé la seva totalitat. És només en la transició d'IVF 'Normal' a 'Alt' quan el cabal d'entrada és 'Alt' (regles 6 i 9), que es produeix un canvi brusco de recirculació, d'un cabal de

recirculació 'Alt' a 'Baix' i viceversa. No obstant, inicialment no és un factor important a tenir en compte ja que la variabilitat d'IVF registrada en l'EDAR Granollers és diària, essent la seva dinàmica lenta en el temps.

Taula 4.16. Base de regles del SCLD_SS5

Q _{en} \ IVF	BAIX	NORMAL	ALT
BAIX	1. Baix	4. Baix	7. Normal
NORMAL	2. Baix	5. Normal	8. Baix
ALT	3. Normal	6. Alt	9. Baix

- Situació IVF baix (bona sedimentació del fang): les accions de recirculació proposades segons les regles 1, 2 i 3 són les mateixes que les de la matriu de decisió del SCLD_SS3.
- Situació IVF normal: el cabal de recirculació de fangs és proporcional al cabal d'entrada a reactor. Aquesta decisió ha estat explicada en detall anteriorment.
- Situació IVF alt (sedimentació del fang dolenta, proliferació de filamentoses): les diferents accions de recirculació a executar segons les regles 7, 8 i 9, en situacions de valors d'IVF elevats, són les mateixes que les de la matriu de decisió del SCLD_SS4.

En resum, es decideix recircular en el mateix sentit que la variació del Q_{en} en les situacions amb valors d'IVF 'Baix' i 'Normal', però amb proporcionalitats diferents. Quan els valors d'IVF s'emmarquen dins l'etiqueta 'Alt', es recircula a la inversa del que entra, amb l'objectiu d'evitar un xoc hidràulic que comporti una rentada de fangs del decantador. La figura 4.18 presenta un exemple de la superfície de control que s'obté del SCLD_SS5 amb la definició de les variables per l'EDAR Granollers.

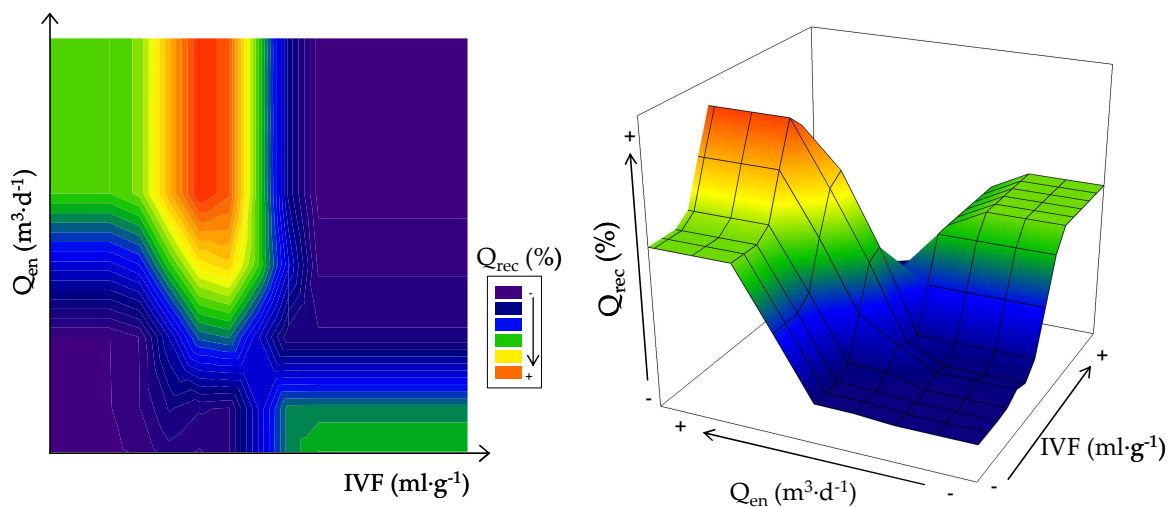


Figura 4.18. Exemple de superfície de control obtinguda amb la matriu de decisió del SCLD_SS5.

S'observa com la superfície és variable amb pendents suaus, exceptuant el salt de cabal de recirculació 'Baix' (quan l'IVF i el Qen són 'Alts') a cabal de recirculació 'Alt' (quan l'IVF passa a 'Normal' i el Qen continua essent 'Alt'). A diferència que les superfícies de les figures 4.16 i 4.17, la gradació de colors no és en diagonal, sinó que la tonalitat blavosa (cabal de recirculació 'Baix') es troba al racó inferior esquerre i al racó superior dret.

SCLD_SS6

El conjunt de regles de la matriu de decisió del SCLD_SS6 es presenta en la taula 4.17. Amb l'objectiu d'evitar el canvi bruscat entre les regles 6 i 9 del SCLD_SS5 es modifiquen les regles de la columna IVF 'Alt' d'aquesta nova matriu, amb el resultat de que es varia la tendència general d'aquesta columna.

Taula 4.17. Base de regles del SCLD_SS6

	BAIX	NORMAL	ALT
BAIX	1. Baix	4. Baix	7. Baix
NORMAL	2. Baix	5. Normal	8. Normal
ALT	3. Normal	6. Alt	9. Normal

La modificació de les regles 7, 8 i 9 es podria dur a terme de diferents maneres per tal d'evitar el canvi bruscat entre les regles 6 i 9 (taula 4.16). La regla 6, que indica una recirculació 'Alta', no es modifica amb l'objectiu de mantenir la recirculació proporcional al cabal d'entrada en la columna d'IVF 'Normal'. Per tant, cal canviar la regla 9 a una recirculació 'Normal' o 'Alta'. Ara bé, aquest canvi està lligat a l'estratègia global de la matriu de decisió, de manera que el canvi en la regla 9, comporta canvis en les altres regles. En aquest cas, es va decidir assignar a la regla 9, un cabal de recirculació 'Normal' ja que si s'escollia un cabal 'Alt', aquesta situació ja era contemplada per la base de regles del SCLD_SS3. Amb la decisió de recircular una mica menys que el cabal d'entrada amb la regla 9 (cabal d'entrada 'Alt' i cabal de recirculació 'Normal'), s'intenta evitar un possible xoc hidràulic a la vegada que es recircula una quantitat considerable que podria evitar l'acumulació excessiva de fang en el decantador. El canvi de la regla 9 comporta el canvi de tendència de la situació IVF alt, que passa de recircular en el sentit contrari a la variació del cabal d'entrada en el SCLD_SS5, a recircular en el mateix sentit en el SCLD_SS6.

Aquesta matriu de decisió és similar a la del SCLD_SS3 (taula 4.14), ja que en totes les situacions es tendeix a recircular de manera proporcional al cabal d'entrada. No obstant, el SCLD_SS6 difereix del SCLD_SS3 en les regles 6, 7 i 8, de manera que la superfície de control ha de presentar menys moments amb cabal de recirculació 'Alt' i en canvi més amb recirculació 'Baixa' que la superfície del SCLD_SS3 (figura 4.16). La figura 4.19 presenta un exemple de la superfície de control que s'obté amb la definició de les variables del sistema de control per l'EDAR Granollers amb el SCLD_SS6.

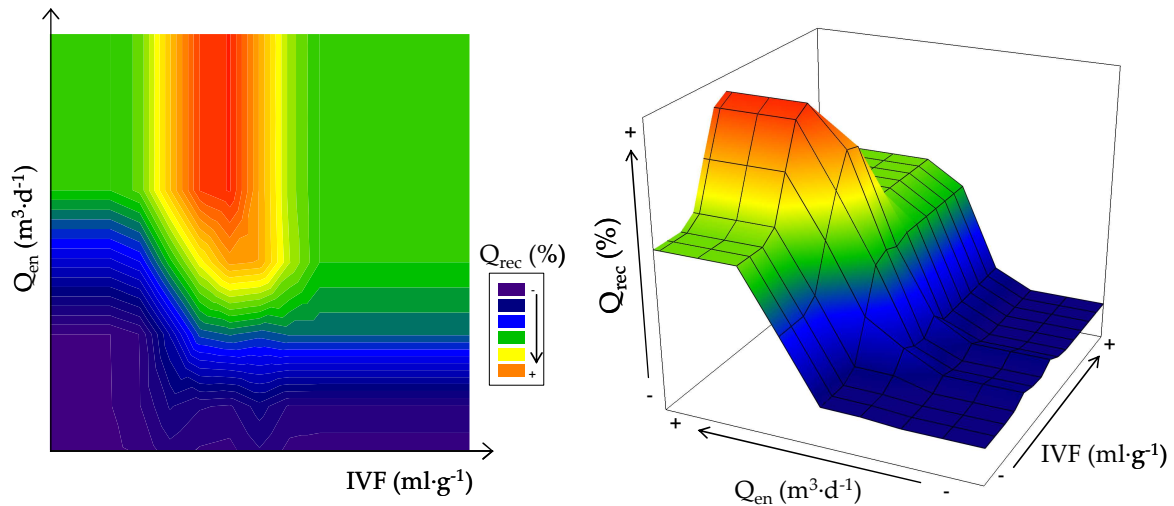


Figura 4.19. Exemple de superfície de control obtinguda amb la matriu de decisió del SCLD_SS6.

S'observa com la superfície és contínua sense canvis de pendent bruscos. En aquest cas, la gradació de colors des de tonalitats blavoses (recirculació baixa) a vermelloses (recirculació elevada) no es produeix en diagonal com en el SCLD_SS3 (figura 4.16) sinó en sentit vertical, amb una canvi de colors més o menys ràpida segons el valor d'IVF.

SCLD_SS7

La matriu de decisió del SCLD_SS7 (taula 4.18) es diferencia de la definida pel SCLD_SS5 (taula 4.16) en la situació d'IVF 'Normal'. En aquesta matriu es prioritza des d'un punt de vista general, evitar un xoc hidràulic en condicions de sedimentació del fang del decantador dolentes i normals (IVF alt i normal). És només en la situació de sedimentació bona del fang, que es prioritza l'objectiu de mantenir la relació F:M del reactor. En aquesta estratègia, es produeix un salt brusco entre les regles 1 i 4 que determinen un cabal de recirculació 'Baix' i 'Alt' respectivament. No obstant, no es descarta aquesta opció (a l'igual que en el cas del SCLD_SS5), ja que els canvis d'IVF són, en principi, de dinàmica lenta.

Taula 4.18. Base de regles del SCLD_SS7

Q _{en} \ IVF	BAIX	NORMAL	ALT
BAIX	1. Baix	4. Alt	7. Normal
NORMAL	2. Baix	5. Normal	8. Baix
ALT	3. Normal	6. Baix	9. Baix

La figura 4.20 presenta un exemple de la superfície de control del SCLD_SS7 que s'obté amb la definició de les variables per l'EDAR Granollers.

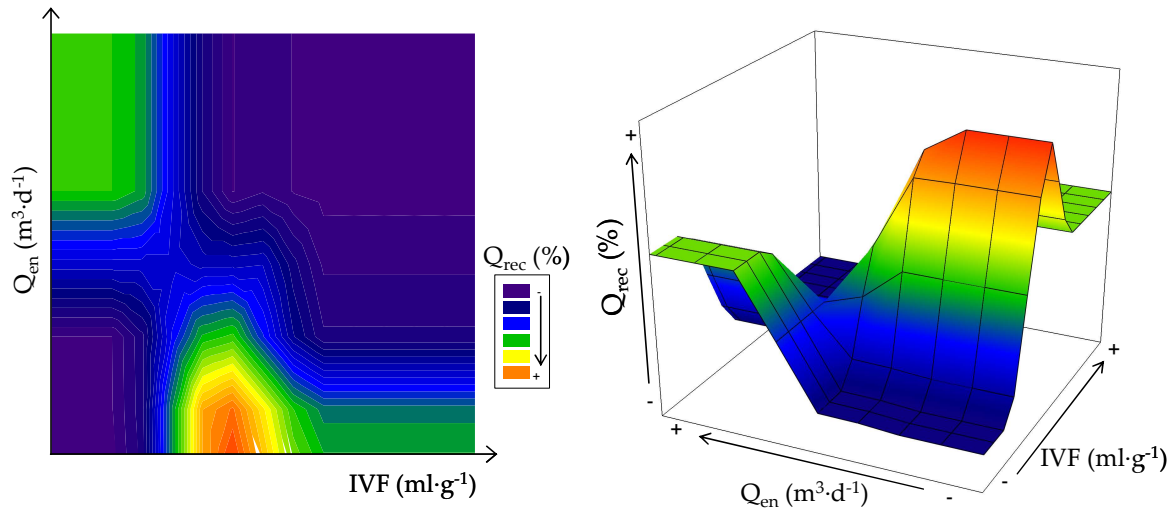


Figura 4.20. Exemple de superfície de control obtinguda amb la matriu de decisió del SCLD_SS7.

En aquesta representació gràfica s'observa el predomini de tonalitats blavoses, indicant que existeixen més situacions de cabal de recirculació baixes que no pas elevades. En el gràfic tridimensional, s'observa una pendent més abrupta quan el cabal d'entrada és 'Baix' i l'IVF augmenta de valors 'Baixos' a 'Normals' o viceversa. Aquesta situació correspon al salt de les regles 1 i 4, d'un cabal de recirculació 'Baix' a 'Alt' o viceversa.

SCLD_SS8

L'última matriu de decisió que es presenta, és la modificació de la base de regles anterior. Amb aquesta matriu es pretén eliminar el salt de cabal de recirculació que es produeix en el SCLD_SS7 (entre les regles 1 i 4) i així poder avaluar les seves conseqüències. Amb l'objectiu d'obtenir una transició suau en tota la matriu i alhora mantenir la tendència a recircular en sentit contrari a la variació del cabal d'entrada en la situació d'IVF normal, es va decidir modificar les regles 1, 2 i 3, tal i com es mostra en la taula 4.19. La variació de la regla 1 per tal de no produir un canvi brusca, va comportar l'obtenció d'una matriu que en la seva totalitat tendia a prioritzar la importància d'evitar un xoc hidràulic al decantador, és a dir, a recircular inversament proporcional al cabal d'entrada. Per tant, el SCLD_SS8 es va convertir en una modificació del SCLD_SS4 (taula 4.15). En aquest cas, es recircula només al màxim quan el cabal d'entrada és 'Baix'. En les altres dues situacions (Q_{en} 'Normal' i 'Alt') es recircula una mica menys (Q_{rec} 'Normal') per deixar més temps al fang del decantador per sedimentar que no pas si es recirculés 'Alt' en la situació de cabal d'entrada 'Normal' (com succeeix en el SCLD_SS4).

Taula 4.19. Base de regles del SCLD_SS8

Q _{en} \ IVF	BAIX	NORMAL	ALT
BAIX	1. Alt ↑	4. Alt ↑	7. Normal ↑
NORMAL	2. Normal	5. Normal	8. Baix
ALT	3. Normal	6. Baix	9. Baix

La figura 4.21 presenta un exemple de la superfície de control del SCLD_SS8 que s'obté amb la definició de les variables per l'EDAR Granollers.

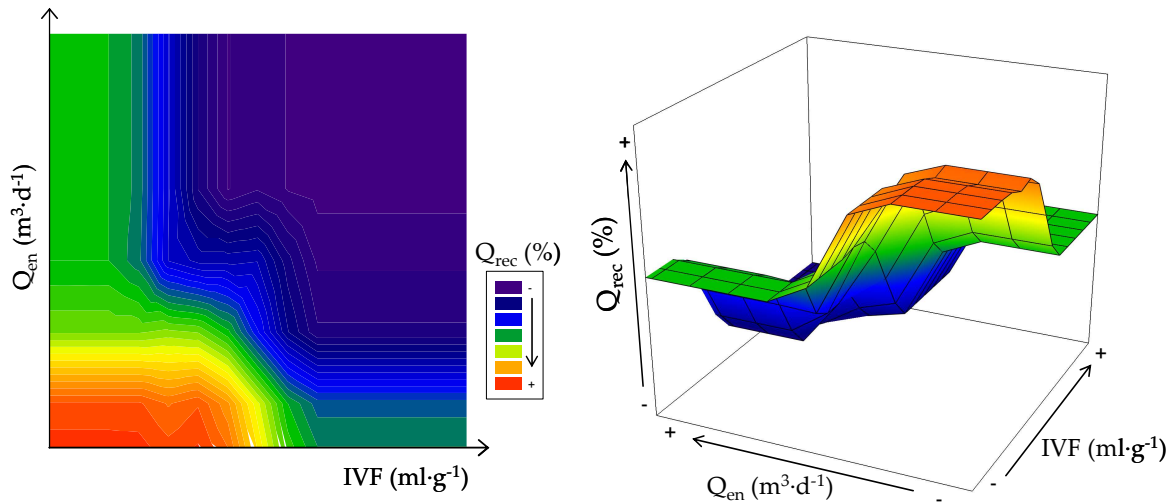


Figura 4.21. Exemple de superfície de control obtinguda amb la matriu de decisió del SCLD_SS8.

Aquesta superfície es diferencia de la superfície del SCLD_SS4 (figura 4.17) en què hi ha menys situacions de recirculació elevada (colors vermellorsos) però mantenint la gradació de tonalitats de colors en diagonal.

IV.5.2.3. Exemple de funcionament del SCLD_SS

La figura 4.22 presenta un exemple del mecanisme de funcionament del SCLD_SS, des de la introducció dels valors discrets de les variables d'entrada (en aquest cas, un Q_{en} de $24000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ i un IVF de $70 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$) fins l'obtenció de la sortida defuzzificada, és a dir, l'acció de control que, en aquest cas, seria un Q_{rec} del 40.5% del cabal màxim de recirculació.

En aquest exemple es contemplen les dues regles següents:

R_1: "Si Q_{en} és 'Normal' I IVF és 'Normal' llavors Q_{rec} és 'Normal'"

R_2: "Si Q_{en} és 'Baix' I IVF és 'Baix' llavors Q_{rec} és 'Baix'"

El cabal de $24000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ pertany amb un 80% al conjunt 'Normal' i amb un 20% al conjunt 'Baix' de la variable difusa Q_{en} , mentre que un IVF de $70 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$ pertany amb un 60% al conjunt 'Baix' i amb un 40% al conjunt 'Normal' de la variable difusa IVF. Realitzada aquesta inferència (procés de fuzzificació), es duu a terme la implicació, que en aquest cas consisteix en calcular el mínim del grau de pertinença de cadascuna de les premisses establertes, és a dir, de les regles 1 i 2 (R_1 i R_2). Amb la implicació s'obté el conseqüent de cada regla, de manera que la variable de sortida Q_{rec} té un grau de pertinença del 40% al conjunt 'Normal' segons la R_1 i del 20% al conjunt 'Baix' segons la R_2.

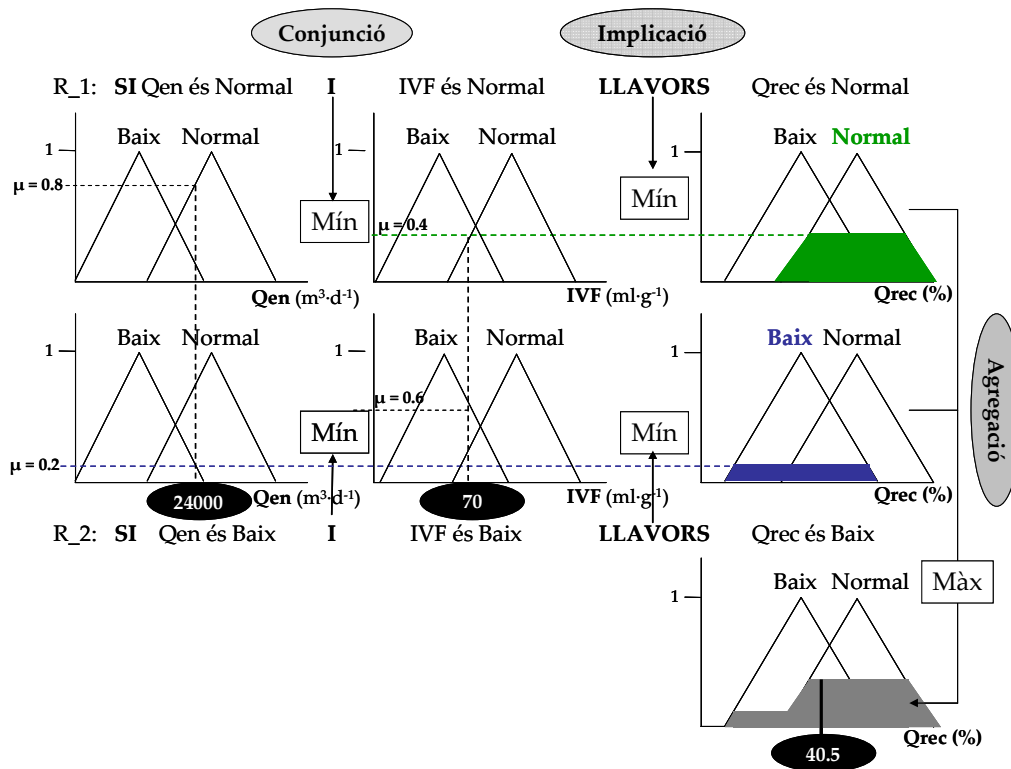


Figura 4.22. Exemple del mecanisme d'inferència i defuzzificació utilitzat en el disseny del SCLD_SS.

A continuació, s'agreguen els conseqüents calculats de les dues regles mitjançant el màxim per obtenir una superfície difusa resultant de la variable de sortida Qrec. L'últim pas consisteix en calcular el valor discret del Qrec de la superfície difusa resultant (procés de defuzzificació). En aquest cas, es calcula mitjançant el mètode del centre de gravetat, i s'obté que l'acció final del controlador és recircular el 40.5% del Qrec màxim.

IV.5.3. Avaluació del SCLD_SS

Amb la proposta de vuit SCLD_SS diferenciats per la seva matriu de decisió, el següent pas per obtenir el sistema de control per implementar a l'EDAR Granollers va ser dur a terme un estudi d'avaluació i comparació de les diferents opcions per escollir-ne la més adequada. Per fer aquesta tasca es van realitzar dos estudis de simulació: un primer, utilitzant un model de planta estandarditzada i un segon, amb el model de l'EDAR Granollers.

Mentre que en el primer estudi de simulació dels SCLD_SS es va utilitzar el protocol Benchmark (Copp, 2002), amb un model de planta estandarditzada i uns escenaris predefinitos, coneguts, utilitzats i referenciats actualment en un gran nombre d'articles científics (Zarrad *et al.*, 2004; Comas *et al.*, 2005; Pons *et al.*, 2005; Vrecko *et al.*, 2005) en el segon estudi es va utilitzar el model de l'EDAR Granollers on posteriorment s'implementaria el SCLD. Aquest segon estudi de simulació es va realitzar amb l'objectiu d'avaluar el comportament dels SCLD_SS seleccionats del primer estudi, encara que treballar amb dades reals comportés l'inconvenient de no poder avaluar totes les actuacions possibles dels sistemes de control.

Abans de dur a terme les simulacions dels diferents SCLD_SS amb un o altre model, es va adequar la definició de les variables d'entrada (Qen i IVF) i de sortida (Qrec) als valors del model de la planta Benchmark i als valors del model de l'EDAR Granollers. És a dir, es van determinar els rangs de valors per 'Baix', 'Normal' i 'Alt' per cadascuna de les variables del SCLD_SS en funció de les dades del model de simulació a utilitzar.

IV.5.3.1. Estudi de simulació amb el model de la planta Benchmark

L'estudi de simulació amb el model d'una planta estandarditzada va ser dut a terme amb el model de l'EDAR Benchmark (Copp, 2002) i en base al seu protocol. En l'apartat III.3 del capítol de materials i mètodes s'explica detalladament el protocol Benchmark, amb la descripció de la planta, els models que utilitza i el procediment de simulació i avaluació.

Procediment de l'estudi de simulació amb el model de la planta Benchmark

El procediment d'aquest estudi de simulació està basat en el protocol Benchmark, definit per Copp l'any 1992. Aquest protocol va ser modificat per adequar-se als objectius de l'estudi. Per dur a terme l'avaluació dels diferents SCLD_SS es va introduir a la planta Benchmark el paràmetre d'IVF (no contemplat en el protocol original). Com que el SCLD_SS utilitza l'IVF com a variable d'entrada, resultava fonamental avaluar el comportament i funcionament de l'EDAR segons la variabilitat d'aquest paràmetre. Per tant, es va introduir un IVF variable en el temps (figura 4.23) per tenir diferents condicions de sedimentació del fang al decantador durant el temps de simulació.

L'objectiu de variar l'IVF amb el temps, fou observar com actuaven les matrius de decisió en les diferents situacions de sedimentació del fang i en la seva transició. Per tal d'aconseguir -ho, es van introduir valors d'IVF 'Baixos', 'Normals' i 'Alts' amb una transició suau entre ells. El període de variació de l'IVF va ser de 14 dies (figura 4.23) en lloc dels 7 dies amb què treballa el protocol Benchmark (on la variabilitat de cabal i composició de l'entrada es repeteix cada 7 dies). Encara que la reducció de la variabilitat de l'IVF als set dies hagués comportat poder utilitzar la metodologia de simulació i avaluació del Benchmark sense modificacions, es va preferir obtenir la variabilitat d'IVF necessària en un període de temps més gran.

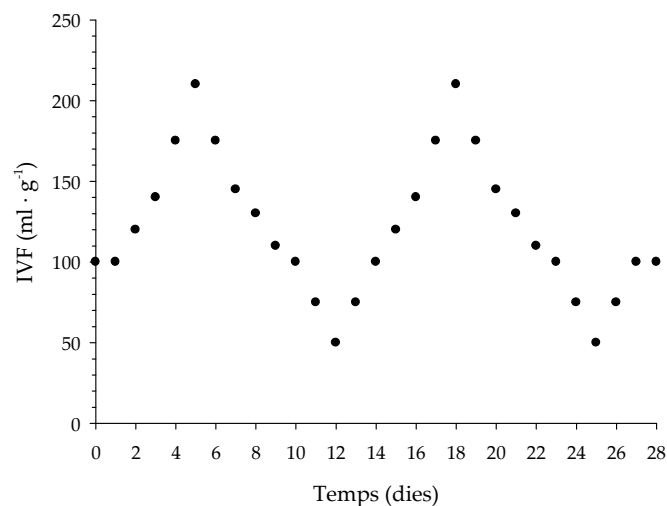


Figura 4.23. Variació en el temps de l'IVF durant les simulacions amb el model Benchmark.

Degut a la introducció d'aquesta nova variant de treballar amb un IVF variable, es va ajustar el procediment de simulació basat en el protocol Benchmark de la següent manera: en lloc de calcular els índexs sobre els 7 últims dies, en aquest estudi es van calcular sobre els últims 14 dies, per tenir en compte la variabilitat de l'IVF. Així mateix, en el protocol Benchmark, la pertorbació produïda per la pluja o tempesta en els escenaris de 'pluja' i 'tempesta' es reflexa només en l'última setmana. En conseqüència, per realitzar les simulacions d'aquest estudi d'avaluació, es va repetir un cop aquesta última setmana, de manera que les pertorbacions duraven 14 dies (figures 4.24 i 4.25), els mateixos dies que durava la variabilitat de l'IVF (figura 4.23).

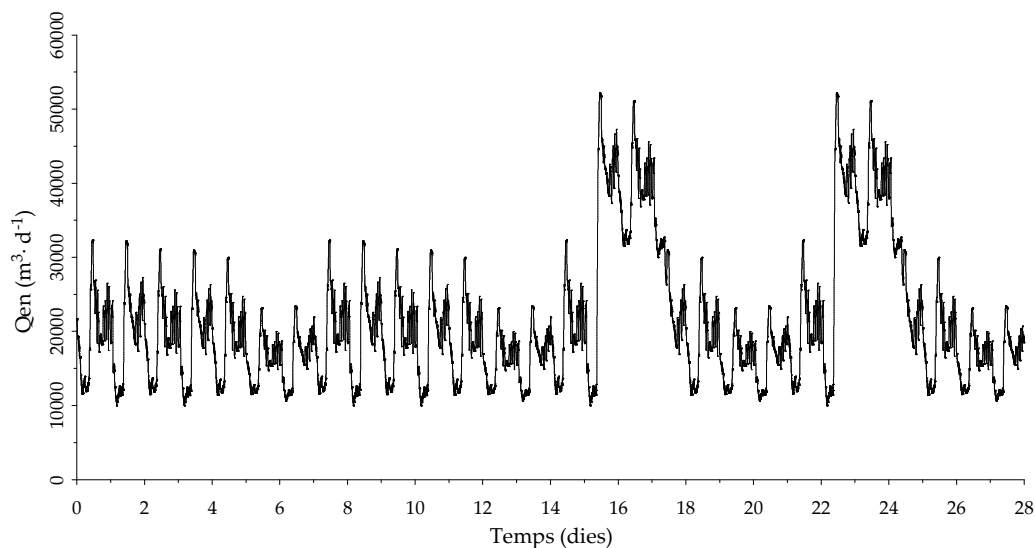


Figura 4.24. Escenari de temps de pluja modificat respecte l'escenari predefinit del Benchmark (figura 3.12). Les dues últimes setmanes presenten pertorbació mentre que en el Benchmark només succeeix en l'última.

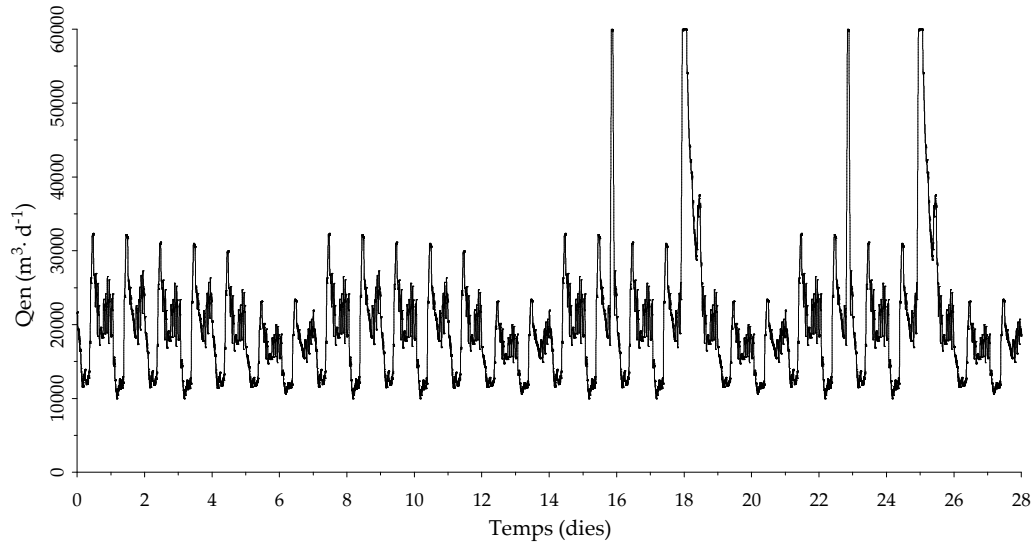


Figura 4.25. Escenari de temps de tempesta modificat respecte l'escenari predefinit del Benchmark (figura 3.11). Les dues últimes setmanes presenten pertorbació mentre que en el Benchmark només succeeix en l'última.

Per tant, mentre que l'escenari de 'temps sec' no es va modificar (figura 3.10), el de temps de 'pluja' i 'tempesta' van ser redefinits amb una setmana més de pertorbació, tal i com es mostra en les figures 4.24 i 4.25.

Definició del SCLD_SS pel model de la planta *Benchmark*.

Abans d'iniciar les simulacions d'avaluació dels diferents SCLD_SS, es van definir els rangs de les funcions de pertinença 'Baix', 'Normal' i 'Alt' per les variables del sistema de control (Q_{en} , IVF i Q_{rec}) en funció de les dades del model de la planta *Benchmark*.

Variable d'Entrada 1: Q_{en}

Per definir les diferents funcions de pertinença ('Baix', 'Normal' i 'Alt') de la variable Q_{en} , es van prendre els valors de cabal d'entrada de l'escenari de temps sec, és a dir, en condicions normals. La partició de l'univers de discurs d'aquesta variable va realitzar-se segons la metodologia explicada en l'apartat IV.5.2.1: el 75% dels valors havien d'estar dins del rang 'Normal', el 12.5% dels valors superiors havien de ser considerats totalment 'Alts' i el 12.5% dels valors inferiors havien de correspondre a l'etiqueta 'Baix'. El límit superior es va fixar en $60000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ per tal d'incloure els valors de cabal de l'escenari de 'pluja' i 'tempesta'. Ara bé, la partició de l'univers de discurs va ser obtinguda a partir dels valors de Q_{en} en condicions normals (escenari de temps sec), tal i com es presenta en la figura 4.26.

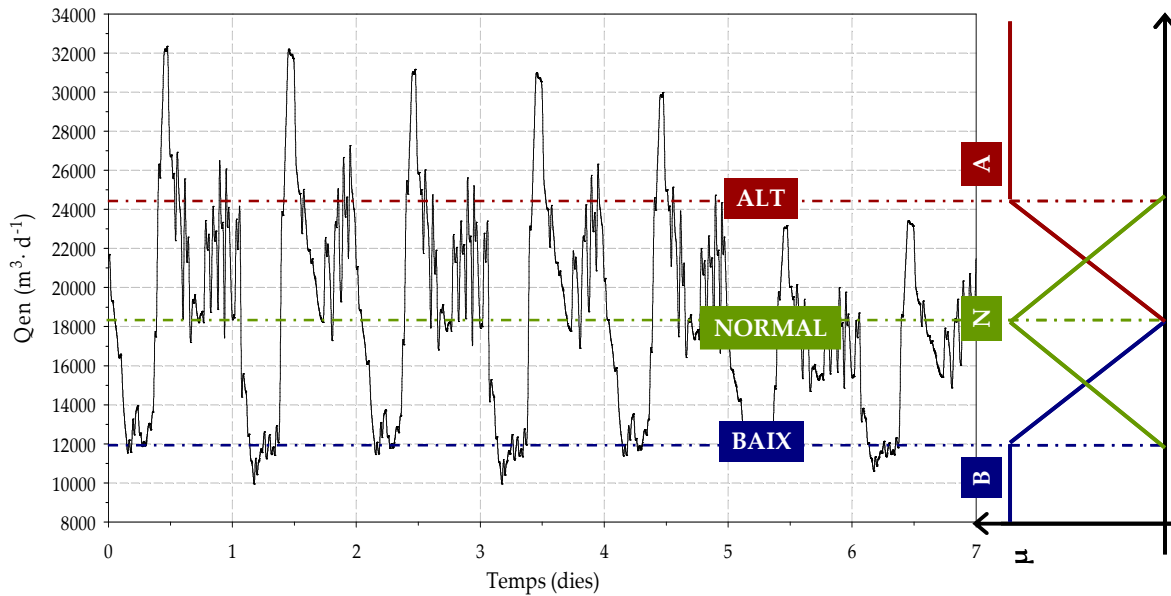


Figura 4.26. Cabal d'entrada setmanal de la planta Benchmark en condicions normals amb la partició de l'univers de discurs en les tres etiquetes lingüístiques ('Baix', 'Normal' i 'Alt').

La taula 4.20 presenta el suport (rang de valors) de cadascuna de les funcions de pertinença que defineixen la variable difusa Qen per l'estudi de simulació amb el model Benchmark.

Taula 4.20. Definició de les funcions de pertinença de la variable Qen en les simulacions de la planta benchmark.

Qen	Suport (m ³ ·d ⁻¹)	Funció de pertinença
BAIX	[0, 18150)	Funció pseudotrapezoïdal
NORMAL	(12000, 24300)	Funció triangular
ALT	(18150, 60000]	Funció pseudotrapezoïdal

A la figura 4.27 es mostra la representació gràfica de les funcions de pertinença definides a la taula 4.20.

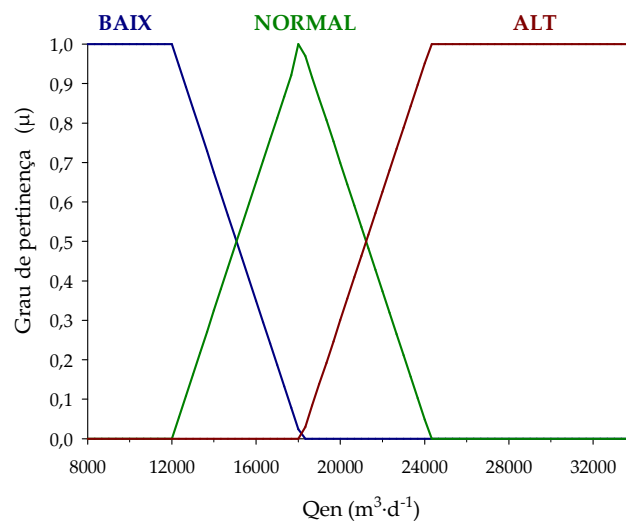


Figura 4.27. Funcions de pertinença de la variable d'entrada Qen en el model de la planta Benchmark.

Variable d'Entrada 2: IVF

La variable difusa IVF no es va modificar respecte la seva definició en l'apartat IV.5.2.1. La taula 4.8 resumeix les funcions de pertinença i el suport de cadascuna d'elles i en la figura 4.11, es representa gràficament la partició de l'univers de discurs en les funcions de pertinença 'Baix', 'Normal' i 'Alt' per aquesta variable.

Variable de Sortida: Qrec

La variable Qrec va ser definida amb percentatges respecte el cabal màxim de recirculació. Les funcions de pertinença de les etiquetes 'Baix', 'Normal' i 'Alt', es troben representades en la figura 4.12 i definides en la taula 4.9. El cabal màxim de recirculació de la planta Benchmark va ser determinat en funció del cabal màxim d'entrada en condicions normals, a l'igual que l'EDAR Granollers. Mentre que a l'EDAR Granollers es considera que un cabal de 28800 m³·d⁻¹ és el cabal màxim d'entrada en condicions normals (i també el cabal màxim de recirculació), en el model de la planta Benchmark aquest valor va ser de 32000 m³·d⁻¹, que era el valor màxim en l'escenari de temps sec (condicions normals).

Resultats de l'estudi de simulació amb el model de la planta Benchmark.

L'avaluació mitjançant simulació de les diferents alternatives (resumides en la taula 4.11) es va realitzar mitjançant el càlcul dels índexs d'avaluació i comparació definits prèviament en l'apartat IV.4. Els índexs de comparació van ser desenvolupats de manera que el seu càlcul tenia com a referència l'estratègia de recirculació a cabal constant, de manera que els SCLD_SS van ser comparats respecte recircular a cabal constant (Qrec CT).

Per aquest estudi d'avaluació mitjançant el model de la planta Benchmark, el cabal constant a recircular (Qrec CT) va ser de 18446 m³·d⁻¹, que és la recirculació amb la qual s'opera per defecte la planta Benchmark a més de ser el valor mig del Qen de l'escenari temps sec (condicions normals).

Les taules 4.21 - 4.26, presenten els resultats del rendiment del procés simulat segons l'estratègia de recirculació (és a dir, segons Qrec CT i els vuit SCLD_SS) sota tres escenaris diferents, condicions normals: escenari temps sec, i condicions de pertorbació: escenari tempesta i escenari pluja. En totes les simulacions, les condicions de sedimentació del fang són variables en el temps (tal i com es mostra en la figura 4.23).

Resultats simulacions escenari temps sec.

Els resultats de les simulacions realitzades sota condicions normals, és a dir, amb l'escenari de temps sec, es presenten en les taules 4.21 i 4.22.

A la taula 4.21 es troben els resultats segons el càlcul dels índexs d'avaluació mentre que, a la taula 4.22 es mostren els resultats segons el càlcul dels índexs de comparació.

Taula 4.21. Índexs d'avaluació i resultats de les simulacions en l'escenari temps sec i amb IVF variable en el temps.

ESTRATÈGIES RECIRCULACIÓ		ESCENARI TEMPS SEC (I. Avaluació)			
Ref.	Qrec CT	QE _{ss} (kg SS·d ⁻¹)	TV _{ss} (%)	CEB _{rec} (kw·h·d ⁻¹)	CumED
		311.03	2.45	738.39	0.44
SCLD_SS	1	303.52	2.30	639.76	0.42
	2	293.42	1.19	641.20	0.43
	3	305.13	2.45	651.97	0.49
	4	285.92	1.04	566.36	0.30
	5	287.79	1.04	501.16	0.31
	6	296.87	1.56	564.23	0.39
	7	281.26	1.04	491.95	0.31
	8	284.65	1.04	543.42	0.29

Segons el càlcul dels índexs d'avaluació, operant el procés amb les opcions de 4, 5, 7 i 8 de SCLD_SS s'aconsegueixen els millors rendiments d'eliminació de SS, tant en qualitat de l'efluent (QE_{ss} de 281.66 a 287.79 kg SS · d⁻¹) com en temps mínim d'incompliment del límit legal d'abocament (TV_{ss} de 1.04%). De la mateixa manera, és amb aquestes opcions que es necessita menys energia de bombeig del cabal de recirculació (des d'un índex de CEB_{rec} de 566.36 kw·h·d⁻¹ amb SCLD_SS4 fins 491.95 kw·h·d⁻¹ amb SCLD_SS7). Així mateix, pel que respecta a l'índex d'estabilitat del decantador (més estabilitat quan més a prop de zero es trobi l'índex CumED), les opcions 4, 5, 7 i 8 presenten valors de CumED entre 0.29 i 0.31, mentre que la resta d'opcions no aconsegueixen baixar d'un valor de 0.42 de CumED, indicant una menor estabilitat del decantador.

Taula 4.22. Índexs de comparació i resultats de les simulacions en l'escenari temps sec i amb IVF variable en el temps.

ESTRATÈGIES RECIRCULACIÓ		ESCENARI TEMPS SEC (I. Comparació)			
Ref.	Qrec CT	DQE _{ss} (%)	DTV _{ss} (%)	DCEB _{rec} (%)	DCumED (%)
		Valor de referència			
SCLD_SS	1	-2.41	-6.12	-13.36	-4.55
	2	-5.66	-51.43	-13.16	-2.27
	3	-1.90	0.00	-11.70	11.36
	4	-8.07	-57.55	-23.30	-31.82
	5	-7.47	-57.55	-32.13	-29.55
	6	-4.55	-36.33	-23.59	-11.36
	7	-9.57	-57.55	-33.38	-29.55
	8	-8.48	-57.55	-26.40	-34.09

Calculats els índexs de comparació respecte recircular amb cabal constant (resultats de la taula 4.22), el SCLD_SS7, es perfila com la millor alternativa, obtenint els millors percentatges de rendiment en qualitat de l'efluent, mínim temps d'incompliment de normativa i mínim consum energètic, amb uns percentatges de millora respectivament d'aproximadament el 10%, 58% i 33% respecte Qrec CT. No obstant, les opcions 4, 5 i 8 presenten rendiments similars, entre un 7.5 i un 8.5% de millora en qualitat de l'efluent, els mateixos rendiments en DTV_{ss} i amb estalvis energètics respecte QrecCT entre un 23 i un 32%. A més a més, segons l'índex comparatiu DCumED les opcions 4 i 8 són fins i tot, lleugerament millors que les opcions 5 i 7 amb percentatges del 31.8 i 34.09 % enfront del 29.55% del SCLD_SS 5 i 7.

En resum, els resultats operant amb l'opció 7 no destaquen clarament davant les opcions 4,5 i 8 que també són bones. Si s'observa, des d'un punt de vista general, les taules 4.20 i 4.21, es diferencien dos grups:

- Grup 1: grup de les alternatives amb pitjors resultats, format per SCLD_SS1, 2, 3 i 6.
- Grup 2: grup de les alternatives amb millors resultats, format per SCLD_SS4, 5, 7 i 8.

Per tant, encara que SCLD_SS7 es perfili com la millor opció, els resultat de les altres tres alternatives del mateix grup (SCLD_SS4, 5 i 8) no hi difereixen substancialment, de manera que amb els resultats de les simulacions sota l'escenari de temps sec, no es pot discernir entre les quatre opcions quina és la candidata a ser implementada en la realitat.

Resultats simulacions escenari pluja.

Les simulacions realitzades sota condicions de pertorbació de pluja (figura 4.24), pateixen un increment de cabal que es manté un parell de dies, emulant una període de pluges. Per tant, és normal que en situacions amb aquest tipus de pertorbacions, els resultats obtinguts en rendiment d'eliminació de SS empitjorin en tots els casos respecte operar sota condicions normals (escenari temps sec). Els resultats de les simulacions sota condicions de pertorbació de pluja es presenten en les taules 4.23 i 4.24, amb els respectius càlculs d'índexs d'avaluació i comparatius.

Taula 4.23. Índexs d'avaluació i resultats de les simulacions en l'escenari pluja i amb IVF variable en el temps.

ESTRATÈGIES RECIRCULACIÓ		ESCENARI PLUJA (I. Avaluació)			
Ref.	Qrec CT	QEss (kg SS·d ⁻¹)	TV _{SS} (%)	CEB _{rec} (kw·h·d ⁻¹)	CumED
		515.30	3.78	738.39	0.50
SCLD_SS	1	516.13	3.86	736.26	0.53
	2	466.19	1.11	544.69	0.43
	3	516.54	4.30	731.82	0.58
	4	461.06	1.04	498.08	0.32
	5	484.10	1.93	536.01	0.35
	6	503.25	2.97	627.69	0.47
	7	456.10	0.96	432.67	0.32
	8	459.75	0.96	476.21	0.32

Mentre que recircular a cabal constant comporta estar un 3.78% del temps per sobre dels límits legals d'abocament de SS, amb SCLD_SS7 i 8 només s'incompleixen els límits un 0.96% del temps. Fins i tot, si es comparen els índexs TV_{SS} de l'escenari temps sec (taula 4.21) amb els de l'escenari pluja, s'observa que recirculant segons SCLD_SS7 i 8 es milloren els resultats (de 1.04 a 0.96%) mentre que recirculant a cabal constant s'empitjora de 2.45% en l'escenari temps sec al 3.78% en l'escenari de pluja. Aquesta situació és deguda a que la majoria de regles de les matrius de decisió dels SCLD_SS7 i 8 tenen l'objectiu de minimitzar l'efecte d'un xoc hidràulic. En aquest conjunt de simulacions, el SCLD_SS5 s'allunya dels altres tres SCLD_SS inclosos en el grup 2 (grup de les alternatives que presentaven els millors resultats en condicions normals). En aquest cas, el SCLD_SS5 no respon

com en les simulacions de l'escenari de temps sec, encara que en termes generals continua presentant millors resultats que els SCLD_SS del grup 1, sobretot pel que respecta a l'índex CumED.

Taula 4.24. Índexs de comparació i resultats de les simulacions en l'escenari pluja i amb IVF variable en el temps.

ESTRATÈGIES RECIRCULACIÓ		ESCENARI PLUJA (I. Comparació)			
Ref.	Qrec CT	DQE _{ss} (%)	DTV _{ss} (%)	DCEB _{rec} (%)	DCumED (%)
		Valor de referència			
SCLD_SS	1	0.16	2.12	-0.29	6.00
	2	-9.53	-70.63	-26.23	-14.00
	3	0.24	13.76	-0.89	16.00
	4	-10.53	-72.49	-32.55	-36.00
	5	-6.05	-48.94	-27.41	-30.00
	6	-2.34	-21.43	-14.99	-6.00
	7	-11.49	-74.60	-41.40	-36.00
	8	-10.78	-74.60	-35.51	-36.00

En les simulacions d'aquest escenari és on s'accentua més la diferència amb els resultats obtinguts operant segons SCLD_SS_1, 3 i 6, que, com a norma general, recirculen en el mateix sentit que la variació del cabal d'entrada. Amb aquestes estratègies en temps de pluges es poden produir escapaments de sòlids del decantador i, en conseqüència, empitjorar la qualitat de l'efluent en SS degut a xocs hidràulics. A més a més, el consum energètic per bombeig del cabal de recirculació és major ja que en termes globals, quan entra més cabal d'aigua també se'n recircula més.

Resultats simulacions escenari tempesta.

Les simulacions realitzades sota condicions de pertorbació de tempesta, tal i com es mostra en el gràfic de la figura 4.25, pateixen dos increments bruscos de cabal i càrrega puntual, emulant dues tempestes. Per això, els resultats obtinguts en rendiments d'eliminació de SS i temps d'incompliment dels límits legals són pitjors en tots els casos respecte l'escenari de temps sec. Els resultats de les simulacions sota condicions de pertorbació de tempesta es presenten en les taules 4.25 i 4.26, amb els respectius càlculs d'índexs d'avaluació i índexs comparatius.

Sota condicions de tempesta, el temps que s'aboca per sobre dels límits legals és més elevat en totes les situacions. Ara bé, mentre que amb l'estratègia de recircular a cabal constant el percentatge de temps d'incompliment és del 6.3% amb les estratègies del grup 2 (SCLD_SS4, 5, 7 i 8) es disminueix des del 5% fins el 4.4%.

Els resultats més destacables es troben en l'aspecte de l'estabilitat del decantador: mentre que amb el cabal de recirculació constant s'empitjora la situació passant d'un valor de l'índex CumED de 0.44 en condicions normals a 0.50 en condicions de tempesta, els valors obtinguts amb els SCLD del grup 2, es mantenen al voltant de 0.30 (valors molt similars als obtinguts en condicions normals, de 0.29 a 0.31). En canvi, amb la resta d'alternatives l'estabilitat del decantador empitjora des de valors de 0.40 fins valors de 0.50.

Taula 4.25. Índexs d'avaluació i resultats de les simulacions en l'escenari tempesta i amb IVF variable en el temps.

ESTRATÈGIES RECIRCULACIÓ		ESCENARI TEMPESTA (I. Avaluació)			
Ref.	Q _{rec} CT	Q _{E_{SS}} (kg SS·d ⁻¹)	TV _{SS} (%)	CEB _{rec} (kw·h·d ⁻¹)	CumED
		426.14	6.31	738.39	0.50
SCLD_SS	1	424.00	6.60	679.26	0.45
	2	388.83	4.67	601.69	0.44
	3	424.51	6.68	676.70	0.50
	4	383.52	4.67	546.01	0.31
	5	387.56	4.97	506.09	0.32
	6	409.79	5.49	583.82	0.40
	7	379.15	4.38	493.87	0.30
	8	382.24	4.60	527.10	0.31

A la taula 4.26 s'observa com la qualitat de l'efluent en SS amb les estratègies del grup 2 (SCLD_SS4, 5, 7 i 8) millora entre un 9 i un 11% respecte recircular a cabal constant. L'estratègia del SCLD_SS2, que recircula inversament proporcional al cabal d'entrada en qualsevol de les condicions de sedimentació del fang, també presenta en termes de qualitat (DQ_{E_{SS}} del 8.76% i DTV_{SS} del 26%) bons resultats. No obstant, els valors de consum energètic i estabilitat del decantador són pitjors que els valors obtinguts amb els SCLD_SS del grup 2. Mentre que les estratègies del grup 2 presenten resultats de millora entre el 26 – 33% en DCEB_{rec} i 36 – 40% en DCumED, la resta d'alternatives (entre elles SCLD_SS2) no passen del 21% de millora en DCEB_{rec} i del 20% en DCumED.

Taula 4.26. Índexs de comparació i resultats de les simulacions en l'escenari tempesta i amb IVF variable en el temps.

ESTRATÈGIES RECIRCULACIÓ		ESCENARI TEMPESTA (I. Comparació)			
Ref.	Q _{rec} CT	DQ _{E_{SS}} (%)	DTV _{SS} (%)	DCEB _{rec} (%)	DCumED (%)
		Valor de referència			
SCLD_SS	1	-0.50	4.60	-8.01	-10.00
	2	-8.76	-25.99	-18.51	-12.00
	3	-0.38	5.86	-8.35	0.00
	4	-10.00	-25.99	-26.05	-38.00
	5	-9.05	-21.24	-31.46	-36.00
	6	-3.84	-13.00	-20.93	-20.00
	7	-11.03	-30.59	-33.12	-40.00
	8	-10.30	-27.10	-28.61	-38.00

En general, els SCLD_SS que donen millors resultats continuen essent els mateixos que amb les simulacions anteriors, sota condicions normals i de pluja. Fins i tot en aquest cas, s'accentua l'estalvi energètic respecte a recircular a cabal constant ja que els millors candidats tenen més possibilitats de recircular inversament proporcional al cabal d'entrada. Les millores de qualitat de l'efluent respecte els SS es mantenen en aproximadament un 10% respecte recircular a cabal constant sota condicions de tempesta.

Comentari global dels resultats obtinguts en l'estudi de simulació amb el model Benchmark

Amb els resultats obtinguts de les simulacions sota condicions normals i de pertorbació (taules 4.21 - 4.26) s'observa com els SCLD_SS del grup 2 (SCLD_SS 4, 5, 7 i 8) presenten millors resultats que la resta de SCLD_SS. Tots ells, sense diferències significatives, compleixen els objectius proposats a l'inici de l'estudi:

- minimització d'impacte a medi receptor dels SS, amb millores de qualitat de l'efluent respecte recircular a cabal constant que van del 7 al 11 %, juntament amb una disminució del temps d'incompliment del límit legal d'abocament;
- minimització del consum energètic per bombeig del cabal de recirculació amb un estalvi del 23 al 41% respecte recircular a cabal constant;
- millora de l'estabilitat del decantador amb índexs al voltant de valors de 0.30 independentment de si hi ha una situació de pertorbació, mentre que recircular a cabal constant presenta un empitjorament de l'índex CumED, amb un valor de 0.44 en condicions normals i de 0.50 en condicions de pertorbació (pluja i tempesta).

IV.5.3.2. Estudi de simulació amb el model de l'EDAR Granollers

Com a resultat de l'estudi de simulació amb el model Benchmark es van descartar els quatre SCLD_SS amb pitjors resultats, de manera que a l'hora de continuar l'estudi amb el model de l'EDAR Granollers, els SCLD_SS que es van avaluar foren els següents:

1. SCLD_SS4 (taula 4.15): matriu de decisió que recircula inversament proporcional al cabal d'entrada però amb diferents percentatges i matisos en situacions d'IVF 'Baixos' i 'Alts'.
2. SCLD_SS5 (taula 4.16): les regles de la matriu de decisió barregen les dues tendències de recirculació (directament i inversament proporcional al cabal d'entrada) en la mateixa matriu. Quan l'IVF és 'Baix' i 'Normal' es tendeix a recircular directament proporcional al cabal d'entrada i quan l'IVF és 'Alt' es tendeix a recircular inversament proporcional al cabal d'entrada.
3. SCLD_SS7 (taula 4.18): a l'igual que SCLD_SS5, es barregen les dues tendències bàsiques de recirculació en la mateixa matriu de decisió. Quan l'IVF és 'Baix' es tendeix a recircular directament proporcional al cabal d'entrada i quan l'IVF és 'Normal' o 'Alt', es tendeix a recircular inversament proporcional al cabal d'entrada, amb major o menor proporció segons el cas.

4. SCLD_SS8 (taula 4.19): la seva matriu de decisió modifica les regles de la columna d'IVF 'Alt' del SCLD_SS7 per intentar suavitzar la superfície de control.

Modelització de l'EDAR Granollers

La modelització de l'EDAR Granollers es va dur a terme en tres passos. Primer de tot, es va dissenyar l'esquema de l'EDAR, la línia d'aigües. Per tant, es van determinar les unitats que descriuen la instal·lació (decantadors, reactors,..) així com els seus paràmetres físics i les seves relacions. A continuació es va caracteritzar l'entrada, és a dir, es va introduir el cabal i la composició de l'aigua d'entrada, a la vegada que es van determinar els paràmetres operacionals (cabals de recirculació i purga, tipus d'aeració i similars). Finalment, es van utilitzar els paràmetres cinètics i estequiòmètrics per defecte del model ASM1.

Disseny i construcció del model

Estudiada l'EDAR Granollers, des de la seva configuració fins a les operacions que s'hi duen a terme (apartat IV.3), es va procedir a la seva modelització en el programa de simulació GPS-X (explicat en detall en l'apartat III.2.1). A la figura 4.28 es presenta l'esquema de l'EDAR que es va introduir al programa de simulació.

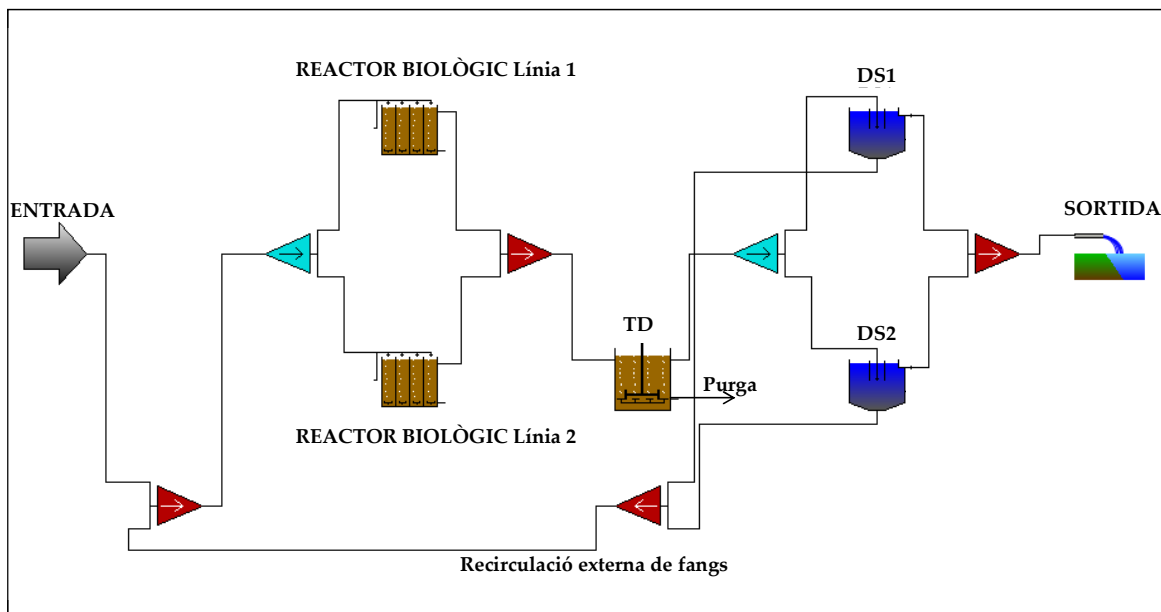


Figura 4.28. Esquema de l'EDAR Granollers en el programa GPS-X.

El diagrama engloba els reactors biològics i els decantadors secundaris, és a dir, no es va modelitzar el pretractament ni el tractament primari. Per això, les dades que defineixen l'entrada d'aigua residual van ser obtingudes del cabalímetre situat abans d'entrar als reactors biològics i de les analítiques de les mostres recollides en el mateix punt, entre el tractament primari i el secundari. Després de l'entrada, la línia d'aigües es divideix en dues línies paral·leles, cadascuna de les quals, amb un reactor biològic del tipus flux pistó de 4388 m³. Cadascuna de les dues unitats està formada per cinc compartiments, el primer del qual pot estar o no airejat, segons si es vol

eliminar nitrogen (en aquest estudi, els cinc compartiments són airejats, ja que durant el període de temps escollit per simular, l'EDAR real no eliminava nitrogen). El primer compartiment té un volum de 324 m³ mentre que els quatre restants tenen cadascun d'ells un volum de 1016 m³. La recirculació interna va del cinquè tanc al segon. Després dels reactors biològics les dues línies s'uneixen en un tanc de desaeració (TD) de 10 m³, a partir del qual la línia d'aigua torna a dividir-se cap a dos decantadors secundaris (DS1 i DS2), on finalment, l'aigua de sortida de cadascuna de les unitats es torna a unir per formar l'efluent (Sortida). Cadascun dels DS presenten una superfície de 707 m² i una profunditat de 3.4 metres. L'alçada de la campana és de 1.9 metres, des d'on s'alimenta el decantador. La purga és realitzada a partir del tanc de desaeració, mentre que els dos cabals de recirculació de cadascun dels DS s'uneixen en un sol cabal, que es barreja amb l'entrada abans de dividir-se de nou cap als dos reactors biològics.

Pel procés biològic que es produeix en els reactors es va emprar el model ASM1 (Henze *et al.*, 1987), explicat en l'apartat III.3.2.1. Pel processos dels decantadors secundaris s'utilitzà el model anomenat 'simple1d', basat en la teoria de flux de sòlids (Patty *et al.*, 1992; Parakevas *et al.*, 1993; Ottherphol *et al.*, 1992; Koehne *et al.*, 1995) on la velocitat de sedimentació és representada amb una doble funció exponencial (Takács *et al.*, 1991). Aquest model 'simple 1d' considera que no es produeixen reaccions biològiques de cap tipus. Només té en compte el comportament dels sòlids i la hidràulica (explicat en detall en l'apartat III.3.2.2)

Caracterització de l'aigua d'entrada

La caracterització de l'entrada es va realitzar en base a la disponibilitat de les dades històriques de l'EDAR Granollers. En aquest cas, la definició de l'afluent es va dur a terme a partir del model basat en la DBO₅ del GPS-X (Hydromantis, 2003b).

En aquest estudi, s'utilitzaren les dades analítiques de composició i cabal d'entrada de dos mesos diferents, maig del 2004 i gener del 2005. L'elecció d'aquests dos mesos es va dur a terme amb l'objectiu de representar dos escenaris amb evolucions i valors d'IVF clarament diferents.

La composició de l'afluent es va definir amb els paràmetres DBO₅, SST i NKT. La variabilitat de les dades de cabal d'entrada utilitzades va ser horària mentre que la variabilitat de la seva composició, diària. Aquesta diferència de variació va ser causa de que el cabal d'entrada de l'EDAR és registrat en continu mentre que els paràmetres de DBO₅, SST i NKT, només s'analitzen un cop al dia.

La taula 4.27 mostra els valors estadístics (mitjana, màxim, mínim i desviació estàndard) dels paràmetres utilitzats per la caracterització de l'entrada.

Taula 4.27. Condicions de l'entrada en les simulacions dinàmiques en l'escenari maig04 i gener05.

Paràmetres	MAIG 2004				GENER 2005			
	Mitjan.	Màx.	Mín.	σ	Mitjan.	Màx.	Mín.	σ
Qen (m ³ ·d ⁻¹)	26954	48944	12137	8008	22220	32050	9181	6430,7
DBO ₅ (gO ₂ ·m ⁻³)	178	233	93	35,4	213,5	317	164	45,4
SST (g·m ⁻³)	114	175	57	32,5	211	447	75	102,7
NKT (gN·m ⁻³)	54	60	44	4,9	75	87	60	8,4

Les figures 4.29 i 4.30 presenten l'evolució del cabal d'entrada durant els dos mesos de simulació (maig04 i gener05).

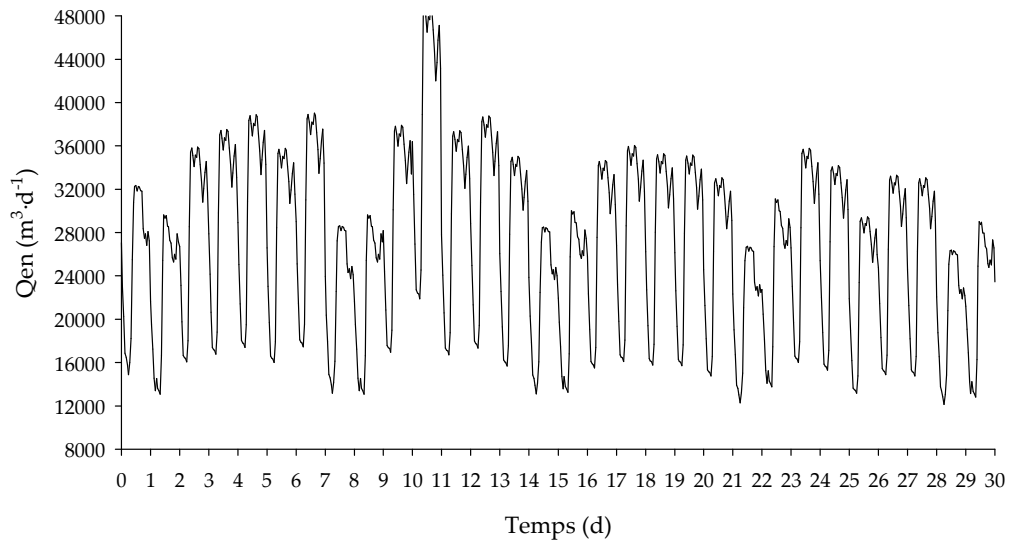


Figura 4.29. Evolució del cabal d'entrada de l'EDAR Granollers durant el mes de maig del 2004.

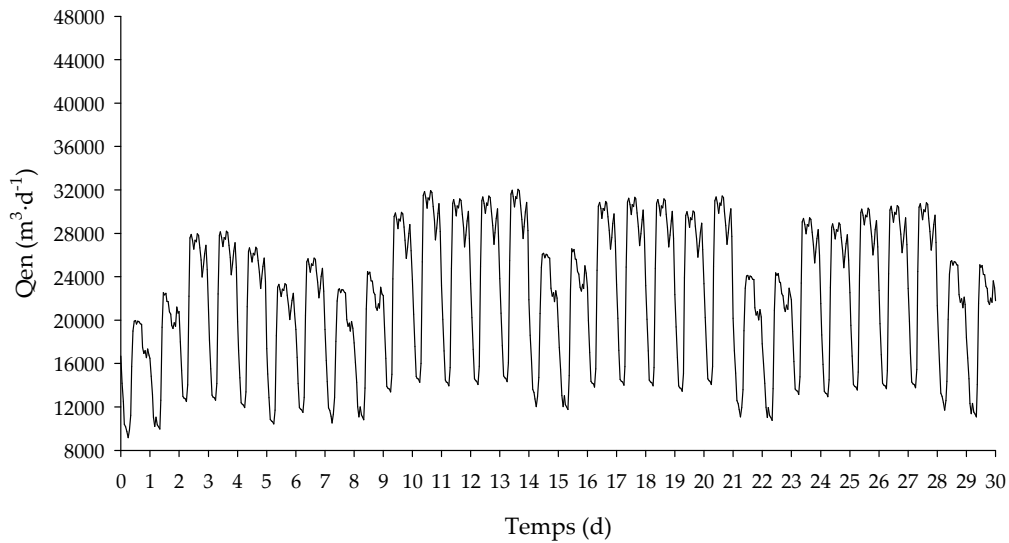


Figura 4.30. Evolució del cabal d'entrada de l'EDAR Granollers durant el mes de gener del 2005.

Determinació de les condicions d'operació

En la taula 4.28 es presenten els paràmetres operacionals que s'introdueixen en el model de l'EDAR Granollers i que corresponen als valors amb els quals es treballava en la instal·lació real.

Taula 4.28. Condicions d'operació introduïdes en el model de l'EDAR Granollers en el GPS-X.

Paràmetres	Cabal (m ³ ·d ⁻¹)	Observacions
Purga	1560	Des del tanc de desaeració (TD)
Recirculació	14400/2	Per cada decantador secundari (DS1 i DS2)
Recirculació Interna	43200/2	Per cada reactor biològic (B1 i B2)

Mentre que els cabals de purga i recirculació interna van ser sempre els mateixos (a l'igual que en l'EDAR real), durant les diverses simulacions amb els SCLD_SS el cabal de recirculació va ser dinàmic amb el temps. En totes les simulacions, es va limitar el cabal de recirculació a 400 m³·d⁻¹ (200 m³·d⁻¹ per decantador) ja que aquest és el cabal mínim de recirculació a l'EDAR Granollers. El valor de 14400 m³·d⁻¹ va ser el cabal utilitzat per simular l'estratègia de recirculació constant (que era el mateix cabal de recirculació que hi havia a l'EDAR Granollers abans de la implementació del SCLD_SS).

Procediment de l'estudi de simulació amb el model de l'EDAR Granollers

Amb la intenció de seguir la mateixa metodologia d'avaluació que el protocol Benchmark, es van simular quatre setmanes partint d'un mateix estat estacionari (obtingut a partir d'una simulació amb les dades mitjanes del mes, operant amb un cabal de recirculació constant de 14400 m³·d⁻¹, i sota condicions de sedimentació del fang normal, valor d'IVF de 100 ml·g⁻¹). Els índexs van ser calculats sobre els 7 últims dies, tal i com marca el protocol Benchmark explicat en l'apartat III.3.

Treballar amb dades reals comporta no poder obtenir la variabilitat desitjada d'IVF per validar totes les situacions contemplades en els SCLD_SS. Mentre que la dinàmica del cabal d'entrada, comporta tenir cabals definits com a 'Baix', 'Normal' i 'Alt' en un mateix dia, la variabilitat de l'IVF és molt més lenta i, en el cas de l'EDAR Granollers, es mou, generalment, al voltant de valors pròxims a un IVF definit com a 'Normal' (100 ml·g⁻¹). No obstant, es van buscar dades reals de l'EDAR que permetessin avaluar la major part de casos possibles (amb IVF 'Baix', 'Normal' i 'Alt'), de manera que es van simular dos mesos diferents: el mes de maig del 2004 on els valors d'IVF es movien bàsicament entre els valors definits com a 'Baix'-'Normal' i el mes de gener del 2005 on hi va haver situacions amb valors d'IVF entre 'Normals' i 'Alts' (taula 4.29).

Taula 4.29. Variabilitat de l'IVF en els mesos de maig del 2004 i gener del 2005 de l'EDAR Granollers.

IVF	Mitjana	Mínim	Màxim	σ
Maig 2004	92.5	72	115	12.5
Gener 2005	120.75	100	153	11,9

La figura 4.31 mostra la representació gràfica de l'evolució de l'IVF durant els dos mesos escollits per dur a terme l'estudi de simulacions amb el model de l'EDAR Granollers.

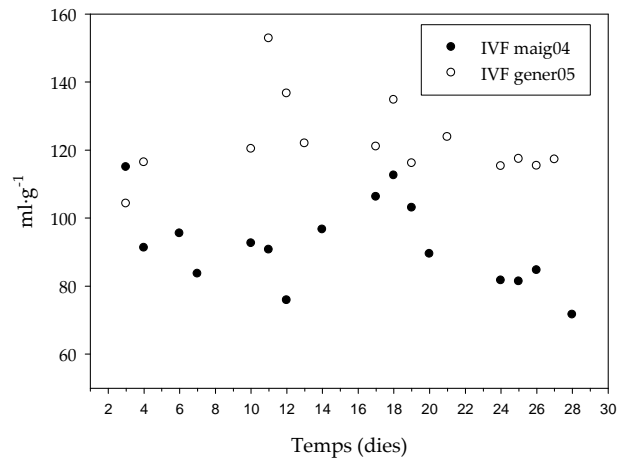


Figura 4.31. Evolució de l'IVF en els mesos de maig del 2004 i gener del 2005 en l'EDAR Granollers.

Definició del SCLD_SS pel model de l'EDAR Granollers.

Abans de procedir amb les simulacions d'avaluació dels quatre SCLD_SS resultants de l'avaluació del primer estudi de simulació (amb la planta Benchmark) va ser necessari (a l'igual que en el cas anterior) adequar les variables difuses del SCLD_SS al model de l'EDAR Granollers.

Variable d'Entrada 1: Qen

La definició de les tres funcions de pertinença ('Baix', 'Normal' i 'Alt'), la partició de l'univers de discurs i el solapament entre funcions de la variable Qen, es va realitzar seguint la metodologia explicada en l'apartat IV.5.2.1. Per tal de complir amb aquesta metodologia, basada en què el 75% dels valors es trobin dins del rang 'Normal' i només el 25% restant es reparteixi equitativament entre 'Alt' i 'Baix' amb una certesa del 100%, l'univers de discurs de la variable Qen va quedar dividida en les tres funcions de pertinença tal i com es mostra en la figura 4.32, on es presenta l'exemple de partició del Qen en un perfil setmanal real de l'EDAR.

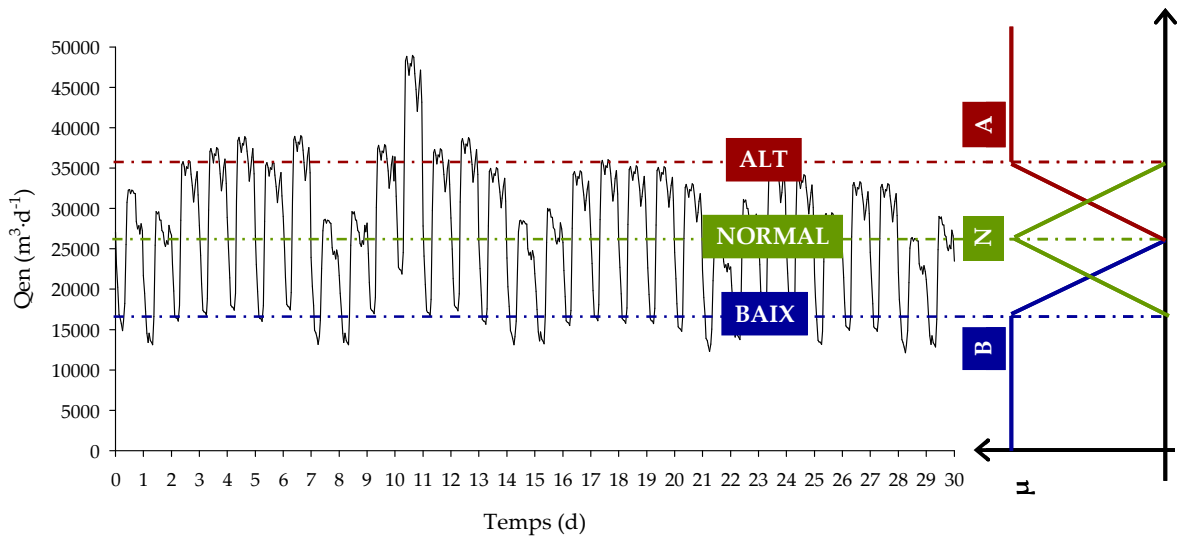


Figura 4.32. Exemple de partició de l'univers de discurs en les tres etiquetes lingüístiques ('Baix', 'Normal' i 'Alt') del cabal d'entrada de la primera setmana de maig 2004 de l'EDAR Granollers.

Aquesta definició del Q_{en} va ser realitzada a partir de les dades històriques de l'EDAR de Granollers durant l'any 2004. La taula 4.30 resumeix el suport (interval de valors) de cada etiqueta lingüística.

Taula 4.30. Definició de les funcions de pertinença de la variable input Q_{en} de l'EDAR Granollers

Q_{in}	Suport ($m^3 \cdot d^{-1}$)	Funció de pertinença
BAIX	[0,25800)	Funció pseudotrapezoïdal
NORMAL	(16050, 35550)	Funció triangular
ALT	(25800, 50000]	Funció pseudotrapezoïdal

Les funcions de pertinença definides en la taula 4.30 es troben representades gràficament a la figura 4.33.

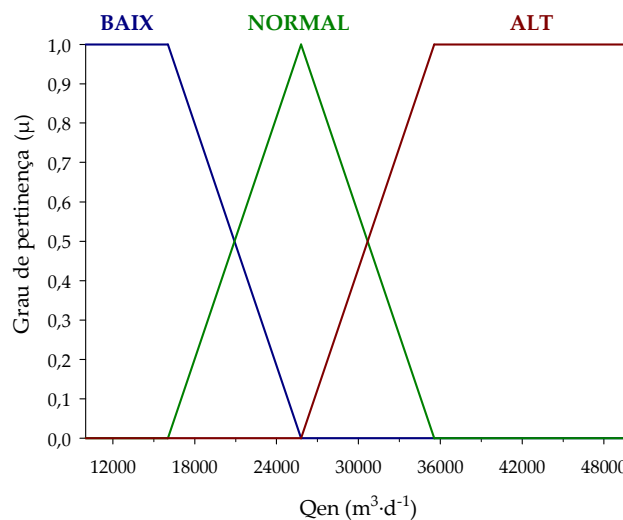


Figura 4.33. Funcions de pertinença de la variable d'entrada Q_{en} en el model de l'EDAR de Granollers.

Variable d'Entrada 2: IVF

A l'igual que en el primer estudi de simulacions amb el model Benchmark, la variable difusa IVF no es modifica respecte la seva definició en l'apartat IV.5.2.1. La taula 4.8 resumeix les funcions de pertinença i el suport de cadascuna d'elles i en la figura 4.11 es representa gràficament la partició de l'univers de discurs en les funcions de pertinença 'Baix', 'Normal' i 'Alt' per aquesta variable.

Variable de Sortida: Qrec

La variable Qrec tampoc es modifica respecte la seva definició en percentatges de la taula 4.9 i figura 4.12. En aquest estudi però, el cabal màxim de recirculació és de 28800 m³·d⁻¹, que és el cabal màxim que es pot bombejar en la instal·lació real.

Resultats de l'estudi de simulació amb el model de l'EDAR Granollers

De la mateixa manera que a l'estudi de simulació realitzat sobre la planta Benchmark (apartat IV.5.3.1), es van calcular els índexs d'avaluació i els índexs de comparació per avaluar els quatre SCLD_SS escollits com a millors alternatives (SCLD_SS4, 5, 7 i 8). Per fer aquests càlculs, també va ser necessari simular el procés amb un cabal de recirculació constant (14400 m³·d⁻¹), i així poder comparar aquesta estratègia amb les altres quatre.

Resultats simulacions escenari maig04.

En les taules 4.31 i 4.32 es presenten els resultats de les simulacions sota les condicions reals de l'EDAR de Granollers del maig del 2004.

Taula 4.31. Índexs d'avaluació i resultats de les simulacions de l'escenari maig04.

ESTRATÈGIES RECIRCULACIÓ		ESCENARI MAIG04 (I. Avaluació)			
		Q _{Ess} (kg SS·d ⁻¹)	TV _{SS} (%)	CEB _{rec} (kw·h·d ⁻¹)	CumED
Ref.	Qrec CT	172.15	0.00	576.86	0.11
SCLD_SS	4	172.22	0.00	680.79	0.21
	5	171.94	0.00	509.33	0.15
	7	170.73	0.00	478.03	0.14
	8	171.34	0.00	602.63	0.20

Les condicions de sedimentació del fang durant la simulació de les dades del mes de maig és considerada bona durant tot el període (valors d'IVF entre 72 i 115 ml · g⁻¹), de manera que no es va observar una millora en la qualitat de l'efluent respecte recircular a cabal constant. No obstant, aconseguint valors similars en l'índex Q_{Ess}, recirculant segons SCLD_SS5 i 7 s'arribava a estalviar entre un 12 i un 17% d'energia de bombeig respecte recircular a cabal constant. Els SCLD_SS4 i 8 presentaven un consum energètic més elevat que Qrec CT.

Taula 4.32. Índexs de comparació i resultats de les simulacions de l'escenari maig04-

ESTRATÈGIES RECIRCULACIÓ		ESCENARI MAIG04 (I. Comparació)			
Ref.	Qrec CT	DQ _{Ess} (%)	DTV _{ss} (%)	DCEB _{rec} (%)	DCumED (%)
		0	0	0	0
SCLD_SS	4	0.04	0.00	18.02	90.91
	5	-0.12	0.00	-11.71	36.35
	7	-0.82	0.00	-17.13	27.27
	8	-0.47	0.00	4.47	81.81

En referència a l'estabilitat del decantador, segons les simulacions, recircular a cabal constant quan les condicions de sedimentació són bones va ser la millor alternativa, amb un valor de l'índex CumED de 0.11. Recircular segons el SCLD_SS5 i 7 també presentaren valors de CumED millors que les altres dues alternatives (0.15 i 0.14). Es va considerar que valors de CumED tan propers a zero (0.11, 0.14 i 0.15) no eren un element de diferenciació a l'hora de seleccionar una opció millor que les altres. Només els casos en què es recirculava segons SCLD_SS4 i SCLD_SS8 van ser classificats com a pitjors, amb valors de 0.21 i 0.20, que representaven un empitjorament del 80 – 90 % respecte QrecCT.

Resultats simulacions escenari gener05.

L'objectiu de les simulacions d'aquest escenari va ser avaluar la part de les matrius de decisió dels SCLD_SS que no s'havien activat en les simulacions de l'escenari maig04. En aquestes simulacions, els valors d'IVF es movien entre valors 'Normals' i 'Alts' (taula 4.29 i figura 4.31) de manera que es van avaluar situacions que no es produïen en l'escenari anterior. Com que les matrius de decisió dels SCLD_SS 4, 7 i 8 (taules 4.14, 4.17 i 4.18) només difereixen en la columna d'IVF 'Baix' (regles 7, 8 i 9), les simulacions a realitzar en aquest escenari foren tres: amb Qrec_CT, amb SCLD_SS5 i amb SCLD_SS4, o 7 o 8). Com a conseqüència, amb els resultats d'aquestes simulacions no es podria diferenciar entre les opcions 4, 7 i 8.

Les taules 4.33 i 4.34 presenten els resultats de les simulacions sota les condicions reals de l'EDAR durant el mes de gener del 2005 mitjançant el càlcul dels índexs d'avaluació i dels índexs de comparació.

Taula 4.33. Índexs d'avaluació i resultats de les simulacions de l'escenari gener05.

ESTRATÈGIES RECIRCULACIÓ		ESCENARI GENER05 (I. Avaluació)			
Ref.	Qrec CT	Q _{Ess} (kg SS·d ⁻¹)	TV _{ss} (%)	CEB _{rec} (kw·h·d ⁻¹)	CumED
		304.4	0.00	576.86	0.35
SCLD_SS	4, 7 o 8	301.85	0.00	513.73	0.25
	5	305.18	0.00	551.74	0.31

Taula 4.34. Índexs de comparació i resultats de les simulacions de l'escenari gener05.

ESTRATÈGIES RECIRCULACIÓ		ESCENARI GENER05 (I. Comparació)			
		DQ _{Ess} (%)	DTV _{ss} (%)	DCEB _{rec} (%)	DCumED (%)
Ref.	Qrec CT	Valor de referència			
SCLD_SS	4, 7 o 8	-0.84	0.00	-10.94	-28.57
	5	0.26	0.00	-4.35	-11.43

Els resultats obtinguts indiquen que no s'aprecien diferències significatives de la qualitat de l'efluent segons el índex Q_{Ess} entre les diferents opcions, així com que no es produeixen violacions del límit legal d'abocament en cap de les estratègies avaluades. No obstant, s'observa que l'estabilitat del decantador obtinguda amb QrecCT, amb un valor de CumED de 0.35, és millorada quan es recircula amb SCLD_SS4, 7 i 8, amb un CumED de 0.25, és a dir, amb una millora de gairebé el 30%. A més a més, el percentatge de consum energètic quan es recircula segons aquests tres SCLD_SS disminueix gairebé un 11% respecte la recirculació a cabal constant.

Comentari global dels resultats de simulació amb el model de l'EDAR Granollers.

Amb els resultats de l'escenari maig04 i gener05 es va concloure que els quatre SCLD_SS proporcionaven bons resultats. La utilització de dades reals va implicar no poder explorar de manera contínua les transicions de les quatre matrius de decisió entre diferents valors d'IVF i cabals d'entrada, comportant que els resultats obtinguts dels quatre SCLD_SS avaluats no fossin molt diferents. Amb aquestes simulacions es va constatar que recirculant segons els SCLD_SS es mantien baixes concentracions de SS a l'efluent; es minimitzava, en la majoria de casos, el consum energètic del bombeig de recirculació respecte l'estratègia Qrec CT (entre un 4 i un 18%) i es millorava l'estabilitat del decantador (entre un 11 i un 28%) quan les condicions de sedimentació del fang no eren del tot bones (escenari gener05).

En resum, en base a aquest estudi de simulació, es va confirmar un comportament correcte de les quatre opcions de SCLD_SS. Totes elles presentaven bons resultats, de manera que només en l'EDAR real seria possible determinar, a llarg termini, quina seria la millor opció.

IV.6. IMPLEMENTACIÓ DEL SCLD_SS A L'EDAR GRANOLLERS

Degut a que els SCLD_SS4, 5, 7 i 8 van aconseguir resultats bons i similars en l'estudi de simulació amb el model de l'EDAR Granollers, l'elecció d'un d'ells per ser implementat en l'EDAR real es va decidir tenint en compte aquelles restriccions físiques i d'operació del decantador que no van poder ser contemplades en l'estudi de simulació.

Per tant el primer pas a l'hora d'implementar el SCLD_SS a l'EDAR Granollers, va ser identificar aquelles restriccions de tipus físic o de procés que podien afectar al seu funcionament. A continuació, es va determinar la

matriu de decisió a implementar, juntament amb la redefinició de les variables difuses del sistema de control (Qen, IVF i Qrec) per funcionar a l'EDAR real. Escollit el SCLD_SS a implementar, aquest va haver d'integrar-se en l'estructura de control que ja existia a la instal·lació, a la vegada que es va desenvolupar una aplicació per l'usuari. Amb aquesta aplicació es va pretendre que el responsable del procés de l'EDAR, pogués conèixer l'estat del procés i el funcionament del SCLD_SS i com a conseqüència, pogués modificar els rangs de valors de les variables del sistema de control per ajustar-lo correctament al procés. Finalment, es va dur a terme la validació del sistema de control implementat a l'EDAR Granollers mitjançant el càlcul d'alguns dels índexs d'avaluació definits pels estudis de simulació.

IV.6.1. Restriccions de l'EDAR Granollers.

El pas de l'estudi de simulació a la realitat comporta tenir en compte una sèrie de restriccions i característiques que no sempre poden ser contemplades en les simulacions. En el cas de l'EDAR Granollers, aquestes restriccions van ser les següents:

- Característiques del decantador secundari: els decantadors de l'EDAR Granollers són circulars de tipus succió. En aquests tipus de decantadors no hi ha una pala que va girant i arrossegant el fang cap al centre sinó que existeixen set tubs de succió al llarg del fons del decantador que van aspirant el fang. La concentració de sòlids a l'última capa té un màxim de compressió ja que existeix un límit de succió (si el fang es troba massa compactat no es pot aspirar). Normalment aquests valors de concentració de sòlids són de 6000 - 7000 g SST·m⁻³. Degut a aquesta limitació, el cabal de recirculació mínim de l'EDAR Granollers és de 300 - 400 m³·h⁻¹. Encara que per simulació es pugui limitar aquest mínim de cabal, el problema radica en modelitzar aquest tipus de decantadors de succió, ja que amb el programa GPS-X només pot introduir-se la profunditat del decantador sense poder determinar el calat, de manera que la pendent d'un decantador de succió és modelitzada amb una inclinació més gran de la que té en la realitat.
- Quan l'EDAR Granollers presenta valors d'IVF de 150 ml·g⁻¹ significa que el procés es troba amb una situació de risc important acompanyada d'una elevada possibilitat d'escapament de sòlids al decantador.
- Quan el procés de l'EDAR Granollers presenta valors elevats d'IVF degut a la presència de *M.Parvicella*, Tipus 021 o *Thiotrix*, la consigna d'operació és recircular un cabal elevat per tal d'evitar condicions de sèpsia al decantador que afavoreixi la presència d'aquests microorganismes filamentosos. Per tant, va ser necessari introduir un mode de seguretat al programa del SCLD_SS, que permet desactivar el mode de control automàtic i passar a manual si es produeix aquesta situació.

IV.6.2. Definició del SCLD_SS per l'EDAR Granollers

Del grup de les quatre opcions factibles per ser implementades segons els estudis de simulació (SCLD_SS4, 5, 7 i 8) es va escollir l'opció 5 (taula 4.16). En el procés de selecció es van tenir en compte les restriccions enumerades en l'apartat anterior i les preferències del cap de planta, de qui a la llarga, havia d'utilitzar aquest sistema de

control i adequar-lo, amb el pas del temps, a les necessitats reals del procés. El sistema de control escollit, el SCLD_SS5, tendeix a recircular directament proporcional al cabal d'entrada en les situacions d'IVF 'Baix' i 'Normal' i, inversament proporcional al cabal d'entrada quan l'IVF és 'Alt' amb l'objectiu de prevenir un xoc hidràulic quan les condicions de sedimentació del fang són dolentes. Amb aquest SCLD_SS5 s'evita la situació de recircular poc quan el Qen és 'Alt' i l'IVF és 'Baix' o 'Normal', amb l'objectiu de no acumular de manera excessiva fangs al decantador.

Escollit el SCLD_SS, abans de procedir a la seva implementació, es van adequar les variables d'entrada i sortida a les diferents etiquetes lingüístiques segons la dinàmica del cabal d'entrada, les condicions de sedimentació del fang activat i el cabal de recirculació que presentava l'EDAR en el moment de la implementació.

Variable d'Entrada 1: Qen

El procediment de partició de l'univers de discurs d'aquesta variable en les tres etiquetes lingüístiques no es va poder ajustar seguint el procediment utilitzat per definir la mateixa variable dels SCLD avaluats per simulació (apartat IV.5.2.1) però sí d'una manera aproximada. A partir de les dades històriques del cabal d'entrada de l'EDAR Granollers es van determinar d'una manera aproximada els límits del rang de valors de cabal d'entrada que havien d'englobar el 75% dels valors. A continuació, tenint en compte les consideracions del cap de planta es va acabar de matisar aquest rang resultant en el suport de la funció de pertinença 'Normal': des dels 19200 m³·d⁻¹ fins els 31200 m³·d⁻¹. Tenint en compte la metodologia emprada durant el capítol per dividir l'univers de discurs (apartat IV.5.2.1), i amb l'objectiu d'obtenir sempre un solapament del 50% i una mateixa distància entre els màxims de certesa de les tres funcions de pertinença ('Baix', 'Normal' i 'Alt'), es va definir el Qen real de l'EDAR Granollers tal i com es presenta en la figura 4.34, on es mostra un perfil típic del cabal d'entrada i la relació amb les tres funcions de pertinença.

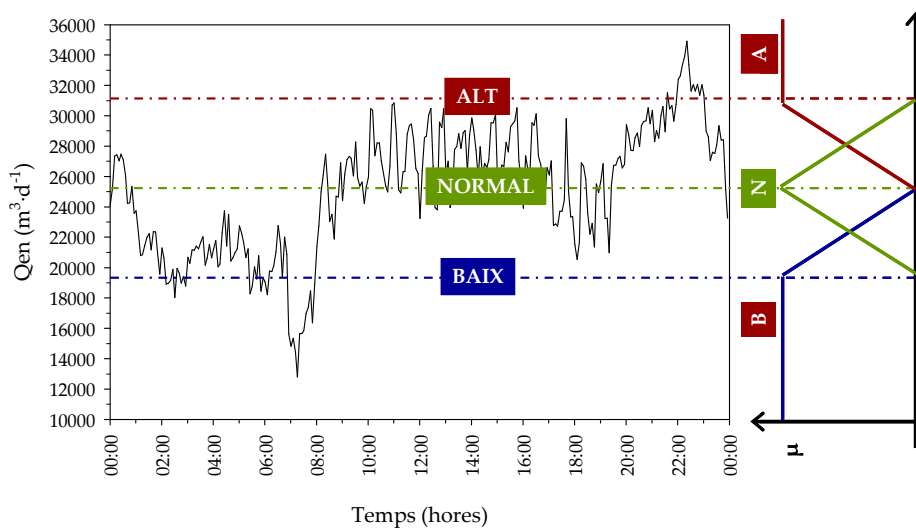


Figura 4.34. Representació gràfica d'un perfil típic diari del Qen de l'EDAR Granollers corresponent al dia 17/11/2004 i la partició de l'univers de discurs en les tres etiquetes lingüístiques ('Baix', 'Normal' i 'Alt').

La taula 4.35 mostra el suport per les tres funcions de pertinença del cabal d'entrada real de l'EDAR Granollers, en funció de la partició de l'univers de discurs realitzada en la figura 4.34.

Taula 4.35. Definició de les funcions de pertinença de la variable d'entrada difusa Qen de l'EDAR de Granollers

Qen	Suport ($m^3 \cdot d^{-1}$)	Funció de pertinença
BAIX	[0, 25200)	Funció pseudotrapezoïdal
NORMAL	(19200, 31200)	Funció triangular
ALT	(25200, 50000]	Funció pseudotrapezoïdal

La figura 4.35 mostra la representació gràfica de les funcions de pertinença definides per la variable Qen de l'EDAR de Granollers.

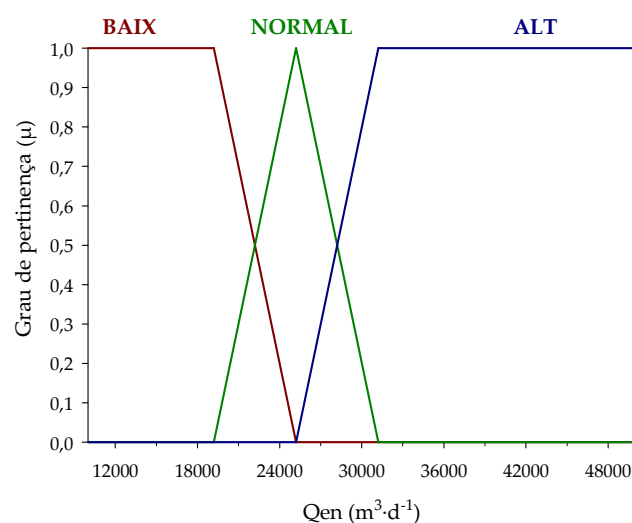


Figura 4.35. Representació gràfica de les funcions de pertinença del cabal d'entrada de l'EDAR Granollers.

Variable d'Entrada 2: IVF

Per la variable difusa de l'IVF, es van mantenir les mateixes funcions de pertinença i els mateixos suports que defineixen la mateixa variable pels estudis de simulació, on per la seva determinació, ja es van tenir en compte valors històrics de l'IVF i coneixements teòrics sobre les condicions de sedimentació del fang segons l'IVF (Jenkins, 2003; Wanner, 1994).

Per tant, un valor d'IVF de $100 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$ va ser considerat 'Normal' amb un grau de certesa del 100%, un IVF a partir de $150 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$, va ser considerat 'Alt' amb un grau de certesa del 100% i un IVF fins $50 \text{ ml} \cdot \text{g}^{-1}$, va ser considerat 'Baix' amb un grau de certesa del 100% (taula 4.8 i figura 4.11).

Variable de Sortida: Qrec

La definició de la variable difusa de sortida de cabal de recirculació en les tres funcions de pertinença de 'Baix', 'Normal' i 'Alt', es va dur a terme de la mateixa manera que en les simulacions (taula 4.9 i figura 4.12), ja que en tractar-se de percentatges, l'únic que es va variar va ser el cabal màxim de recirculació que pot bombejar la instal·lació, que en aquest cas, fou de $28800 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, el mateix cabal que en les simulacions amb el model de l'EDAR Granollers.

IV.6.2.1. Integració del SCLD_SS en els llaços de control automàtic de l'EDAR Granollers

Previ a la implementació del SCLD_SS, l'EDAR Granollers funcionava amb una recirculació constant de $14400 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. Aquest punt de consigna era introduït en un control per retroalimentació del tipus PI (equació 1.5 i figura 4.5), que ajustava el funcionament de les bombes al punt de consigna per que bombegessin el valor de cabal desitjat.

L'existència d'un llaç de control PI per ajustar el cabal de recirculació, va comportar que el SCLD_SS fos implementat com el llaç de control principal d'un control en cascada que indiqués, en cada moment, quin era el punt de consigna del cabal de recirculació. Per tant, l'estructura del control de recirculació de l'EDAR Granollers va resultar en un control en cascada, on el llaç principal va ser un sistema de control basat en lògica difusa i el controlador esclau fou el control PI. La figura 4.36 mostra l'estructura en qüestió.

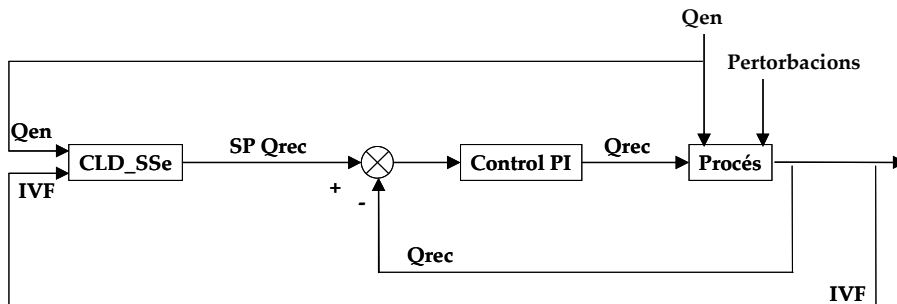


Figura 4.36. Estructura del control en cascada de la recirculació externa de fangs de l'EDAR Granollers on el SCLD_SS és el controlador d'alt nivell i el controlador PI és el de baix nivell.

IV.6.3. Desenvolupament de l'aplicació informàtica pel SCLD_SS.

El SCLD_SS implementat a l'EDAR de Granollers va ser programat en JAVA (explicació en l'apartat III.4 i codi del programa en l'annex 2) amb una interfície (figures 4.37, 4.38 i 4.39) que permet a l'expert_usuari modificar:

- l'univers de discurs de cada variable (Q_{en} , IVF i Q_{rec}),
- la partició de l'univers de discurs en les tres etiquetes lingüístiques ('Baix', 'Normal' i 'Alt'),
- la matriu de decisió (les 9 regles de la base de regles)
- les condicions de seguretat (el cabal de recirculació mínim i la possibilitat d'activar /desactivar les regles quan es donin situacions especials)

El SCLD_SS mesura el Qen en línia cada minut. No obstant, l'IVF no es pot obtenir en continu a temps real ja que no es disposa d'una sonda en línia, de manera que aquesta dada s'obté del laboratori i és introduïda manualment cada dia. A més dels valors d'IVF i Qen, necessaris per executar el sistema de control, aquest programa també enregistra la concentració SS de sortida i Qrec per poder fer el seguiment i avaluació de la implementació del SCLD_SS. La figura 4.37 mostra un exemple de la pantalla principal del programa del SCLD per a l'usuari. Aquesta pantalla és de lliure accés per qualsevol usuari.

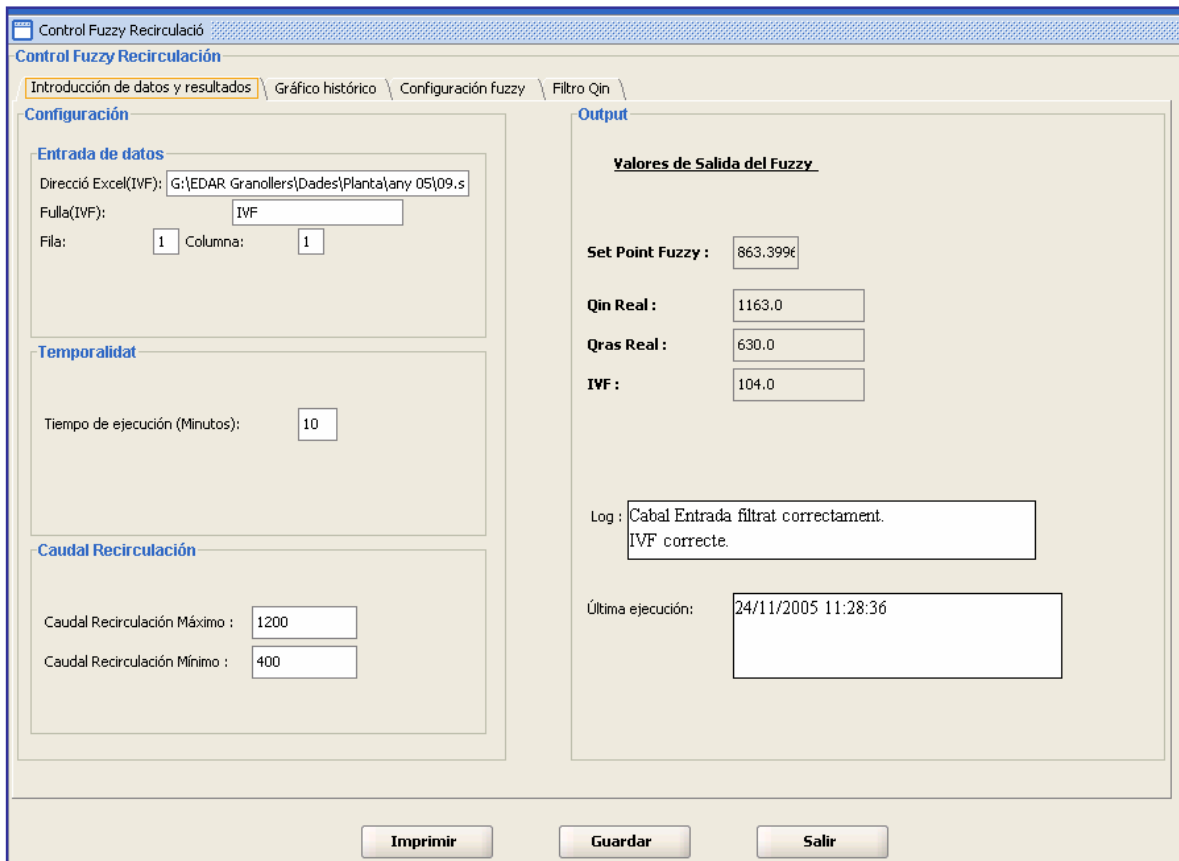


Figura 4.37. Exemple de la pantalla principal de la interfície del programa del SCLD_SS implementat a l'EDAR Granollers

La figura 4.38 presenta un exemple de la pantalla on l'usuari pot introduir els rangs de valors de cada variable del SCLD_SS, modificar els suports de les funcions de pertinença per cada variable i la base de regles. Aquesta pantalla està protegida per una contrasenya per què només hi pugui accedir l'expert.

Definición de los Conjuntos Fuzzy

1. Conjuntos d'entrada

Ivf Baix: 0 <= 0 <= 50 <= 100
 Ivf Normal: 50 <= 100 <= 100 <= 150
 Ivf Alt: 100 <= 150 <= 250 <= 250

Qin Baix: 382 <= 600 <= 800 <= 1050
 Qin Normal: 800 <= 1050 <= 1050 <= 1300
 Qin Alt: 1050 <= 1300 <= 1450 <= 1600

2. Conjunts de sortida

Qras Baix: 0 <= 0 <= 25 <= 50
 Qras Normal: 25 <= 50 <= 50 <= 75
 Qras Alt: 50 <= 75 <= 100 <= 100

Definición de las Reglas Fuzzy

- Si Ivf = BAIX i Qin = BAIX llavors Qras = BAIX
- Si Ivf = BAIX i Qin = NORMAL llavors Qras = BAIX
- Si Ivf = BAIX i Qin = ALT llavors Qras = NORMAL
- Si Ivf = NORMAL i Qin = BAIX llavors Qras = BAIX
- Si Ivf = NORMAL i Qin = NORMAL llavors Qras = NORMAL
- Si Ivf = NORMAL i Qin = ALT llavors Qras = ALT
- Si Ivf = ALT i Qin = BAIX llavors Qras = NORMAL
- Si Ivf = ALT i Qin = NORMAL llavors Qras = BAIX
- Si Ivf = ALT i Qin = ALT llavors Qras = BAIX

Gráfico Fuzzy + Matriz Reglas Fuzzy

Imprimir Guardar Salir

Figura 4.38. Captura de la pantalla on s'introdueixen els valors de les variables difuses i les regles 'Si-Llavors' del SCLD.

Per acabar, en la figura 4.39 es troben representades les funcions de pertinença de les tres variables difuses (Qen, IVF i Qrec) i la matriu de regles 'Si-Llavors'.

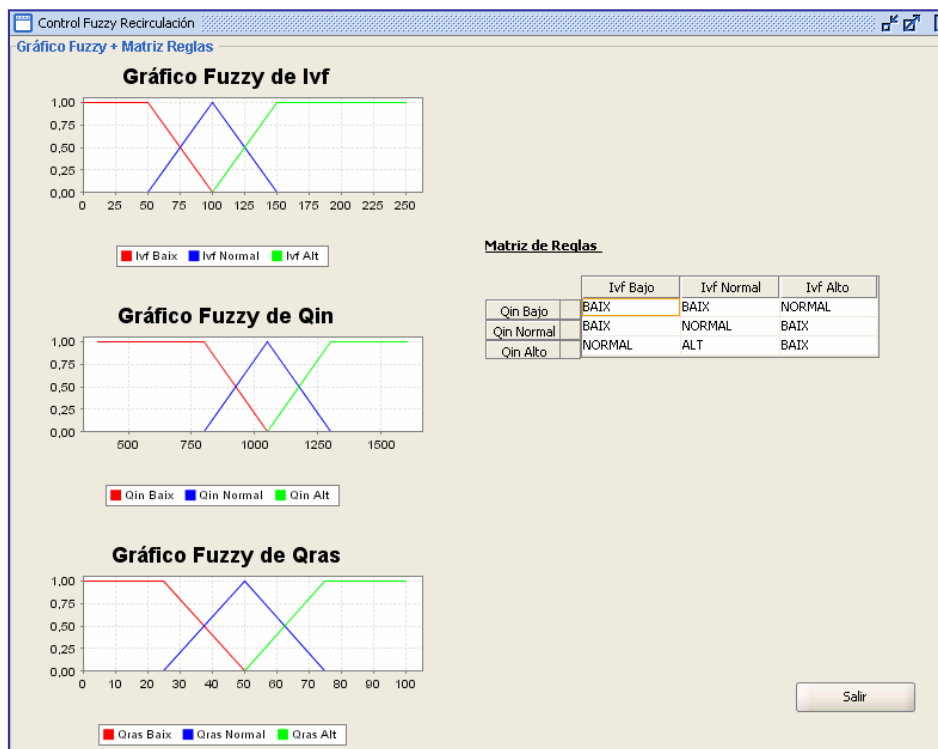


Figura 4.39. Captura de la pantalla on es representen gràficament les funcions de pertinença de les variables difuses i es mostra la matriu de regles difuses del SCLD.

Degut a que la variació del punt de consigna de cabal de recirculació fixat pel SCLD_SS depèn, un cop fixat l'IVF diari, del cabal d'entrada al reactor, va ser necessari filtrar els valors de Q_{en} per tal de suavitzar la variabilitat que es produïa en conseqüència al Q_{rec} . Es va optar per utilitzar un filtre digital del tipus IIR (Infinite Impulse Response o filtre recursiu) de 5è ordre (Lynn i Fuerst, 1998; Smith, 1999). Amb aquest filtre, es dóna més pes als valors filtrats més recents (0.3 pel primer valor filtrat, 0.2 pel segon i tercer valor filtrat, i 0.1 pel quart i cinquè valor filtrat així com també pel valor actual).

$$Y_0 = a_0 * X_0 + a_1 * Y_{-1} + a_2 * Y_{-2} + a_3 * Y_{-3} + a_4 * Y_{-4} + a_5 * Y_{-5} \quad (4.11)$$

On X és el valor real instantani

Y són els valors filtrats

$a_0 = 0.1$

$a_1 = 0.3$

a_2 i $a_3 = 0.2$

a_4 i $a_5 = 0.1$

La figura 4.40 mostra un exemple d'un perfil diari del cabal d'entrada a reactor sense filtrar i filtrat mitjançant el filtre recursiu de 5è ordre escollit.

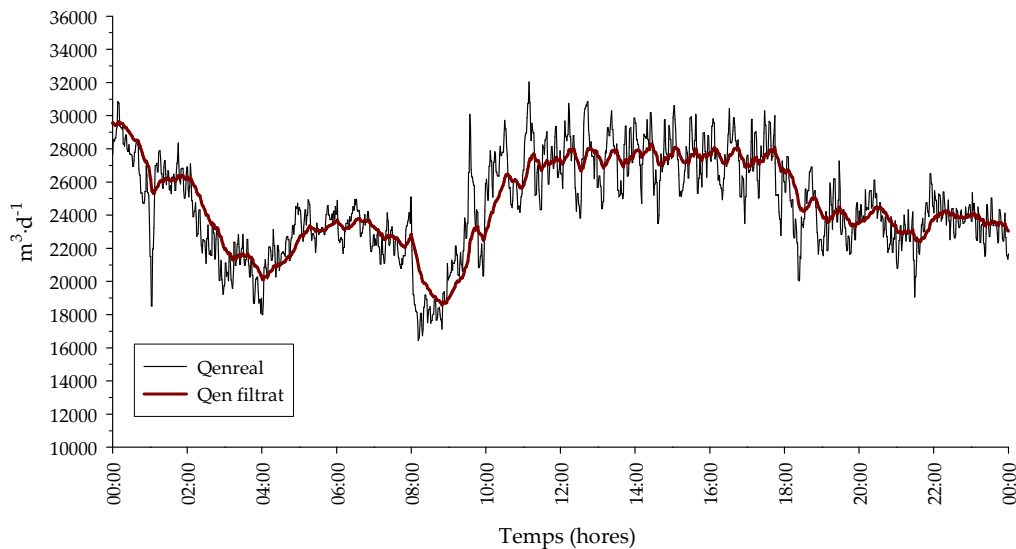


Figura 4.40. Perfil del Q_{en} de l'EDAR Granollers del dia 3 de juliol amb la representació del cabal real i del cabal filtrat.

El filtre presentat a la figura 4.40 s'ajusta a les petites variacions del cabal d'entrada a la vegada que evita les grans oscil·lacions que es poden produir en el cabal d'entrada.

IV.6.4. Validació del SCLD_SS a l'EDAR Granollers

La validació de la implementació del SCLD_SS es va realitzar durant la primera quinzena de febrer del 2005. Per avaluar-ne la seva eficiència es van comparar els resultats de les dues setmanes, la primera en la que s'operava amb un punt de consigna de recirculació constant (Qrec_CT), és a dir, només amb el control PI, i la segona en la que s'operava amb un punt de consigna variable fixat pel SCLD_SS.

L'avaluació es va dur a terme mitjançant el càlcul dels índexs d'avaluació amb algunes modificacions, ja que algun d'ells no van poder ser utilitzats per manca de dades i altres van adequar-se a la nova situació:

- En lloc de calcular els índexs setmanals com a l'estudi de simulació, es van anar calculant diàriament.
- Encara que es van comparar els resultats dels diferents dies des d'un punt de vista global, es va decidir no calcular els índexs de comparació, ja que els cabals i càrregues de contaminació d'entrada variaven diàriament, de manera que no es podia comparar la mateixa situació operant amb Qrec_CT i amb cabal de recirculació fixat pel SCLD_SS.
- L'índex CumED no va ser calculat ja que l'EDAR Granollers no disposava d'instrumentació per poder tenir en línia la concentració de SS en les diferents capes del decantador, de manera que l'estabilitat del sistema no va ser mesurada. Una alternativa podia haver estat mesurar l'alçada de fangs al decantador, però a l'EDAR Granollers tampoc es disposava d'un sensor en línia i només es realitzaven mesures puntuals.

És important remarcar que cal prendre distància en l'avaluació dels diferents índexs ja que quan es treballa en EDAR reals, hi ha molts paràmetres que no poden ser controlats. La taula 4.36 presenta els resultats obtinguts del càlcul dels índexs d'avaluació durant cinc dies recirculant a cabal constant i sis dies recirculant segons el SCLD_SS. Durant els dies en què es va realitzar l'avaluació i comparació entre Qrec_CT i recirculació fixada pel SCLD_SS, les condicions de sedimentació del fang no van variar dràsticament i els valors d'IVF es van mantenir dins d'un rang entre 90 – 120 ml · g⁻¹ (taula 4.37), de manera que la situació a controlar durant els dies en que es va validar el SCLD_SS va ser una situació normal. Fins al moment, no s'han donat situacions extremes d'IVF elevats o al contrari, d'IVF baixos, de manera que no s'ha pogut avaluar el SCLD_SS en aquestes condicions.

Taula 4.36. Resultats del procés recirculant a cabal constant i recirculant segon el SCLD_SS (càlcul dels índexs d'avaluació).

Estratègies de Recirculació	Data (dies)	QE _{ss} (g · m ⁻³)	TV _{ss} (%)	CEB _{rec} (kwh·d ⁻¹)
Qrec_CT	02/02/2005	30,07	19,56	576,24
	03/02/2005	30,1	33,7	579,78
	04/02/2005	33,64	54,79	577,48
	05/02/2005	30,32	23,99	576,98
	06/02/2005	26,08	3,74	575,54
SCLD_SS	08/02/2005	24,13	0	631,58
	09/02/2005	21,19	1,94	659,51
	10/02/2005	26,81	0,55	575,57
	11/02/2005	28,74	1,66	595,34
	12/02/2005	31,82	8,04	549,96
	13/02/2005	29,18	12,2	480

Tot i els inconvenients de realitzar una avaluació-comparació en situació real, s'observa com la implementació del SCLD_SS va mantenir l'estabilitat del sistema, i com, amb una situació de pluja (taula 4.37) dels dos primers dies (8 i 9 de febrer) no es va produir un augment de la concentració de SS a la sortida, indicada per l'índex QE_{ss}.

Taula 4.37. Valors de l'IVF i mitjana del cabal d'entrada durant l'estudi d'avaluació de la implementació del SCLD_SS en EDAR real.

Estratègies de Recirculació	Data (dies)	IVF (ml · g ⁻¹)	Mitjana Qen (m ³ ·d ⁻¹)
Qrec_CT	02/02/2005	104	24300
	03/02/2005	115	23933
	04/02/2005	116	24016
	05/02/2005	92	21134
	06/02/2005	105	20317
SCLD_SS	08/02/2005	101	32455
	09/02/2005	117	29039
	10/02/2005	94	24651
	11/02/2005	95	24573
	12/02/2005	101	22397
	13/02/2005	103	19841

Si es calcula la mitjana dels diferents índexs segons recircular amb cabal constant o segons el SCLD_SS (taula 4.38), s'observa com el SCLD_SS manté i fins i tot disminueix la concentració de SS a la sortida en un 10,2 % respecte recircular a cabal constant, així com una millora del 85% pel que respecta al percentatge de temps que es supera el límit legal d'abocament de SS.

Taula 4.38. Resultats comparatius d'avaluar en l'EDAR Granollers l'operació de la recirculació amb i sense SCLD_SS.

Estratègies de Recirculació	Q _{Ess} g · m ⁻³	TV _{ss} (%)	EB _{rec} (kwh·d ⁻¹)
Q _{rec} CT	30,04	27,16	577,20
SCLD_SS	26,98	4,07	581,99
% millora	10,20	85,03	- 0,83

Respecte al consum energètic, s'observa un lleuger increment quan es recircula segons el SCLD_SS encara que poc important, un 0,83%. Aquest fet és degut a la variabilitat de cabals que hi ha en els diferents dies d'avaluació i que, com ja s'ha dit anteriorment, la matriu de decisió del SCLD_SS treballa en condicions molt properes a la situació d'IVF normal. És a dir, no s'ha pogut avaluar el consum energètic quan la situació és més extrema i quan, segons les simulacions, és on el SCLD_SS millora l'estalvi energètic respecte recircular amb cabal constant. Si s'observa la taula 4.36, es constata que l'energia de bombeig de la recirculació és molt variable segons el dia, essent superior en els primers dies (quan hi ha un cabal més elevat).

IV.7. DISCUSSIÓ SOBRE EL PROCÉS DE DISSENY, IMPLEMENTACIÓ I VALIDACIÓ DEL SCLD_SS

Abans de la implementació del SCLD_SS, a l'EDAR Granollers es recirculava amb un cabal constant, independentment de la variabilitat de l'entrada i les condicions de sedimentació del fang. Amb la implementació del SCLD per minimitzar la concentració de SS a l'efluent, es pretenia millorar la gestió del decantador modificant el cabal de recirculació en base a la relació entre les variables de cabal d'entrada i les condicions del fang, sobretot en condicions allunyades de la normalitat (com per exemple períodes de pluges, IVF elevades,...). Com a resultat, es va automatitzar el control de la recirculació sense la necessitat que els operaris de l'EDAR haguessin de fer un seguiment de les variables, ni relacionar els valors de cabal d'entrada i les condicions de sedimentació de la biomassa.

La variabilitat de l'entrada va ser obtinguda mitjançant el registre en línia a temps real del cabal. Ara bé, les condicions de sedimentació del fang no van poder ser registrades en continu, havent de recórrer a la mesura analítica diària de l'IVF i a la introducció del seu valor manualment en el sistema de control. L'ús d'un sensor en línia de l'IVF o de l'alçada del fang hagués comportat una millora en el SCLD_SS, no només a nivell de precisió sinó també d'autonomia del sistema de control.

La definició de les regles 'Si-Llavors' va ser realitzada en base a dues tendències oposades de recirculació: directament o inversament proporcional al cabal d'entrada. L'ús de la lògica difusa va ser clau per poder introduir les dues tendències en el mateix sistema de control, prioritant una o altra tendència segons la situació que es produïa. D'aquesta manera, el SCLD_SS dissenyat fixava un determinat cabal de recirculació tenint en compte la variabilitat del cabal d'entrada segons les condicions de sedimentació del fang.

Durant el procés de desenvolupament del SCLD_SS, és important comptar amb l'experiència del cap de planta, sobretot quan, com en aquest cas, no es podia recórrer a un registre històric complet de les variables que afectaven al procés que s'havia de controlar.

Pel que respecta al disseny del SCLD_SS, es va tendir a minimitzar el número d'etiquetes lingüístiques necessàries per definir les variables del sistema (tres per cada variable), sense que això perjudicés la definició completa de cadascuna d'elles. Aquest fet va comportar també una minimització de les regles 'Si-Llavors' a determinar. La base de regles constava com a màxim de 9 regles, la qual cosa va simplificar el càlcul a realitzar per a cada inferència, alhora que van ser considerades suficients per incloure les accions necessàries per les diferents situacions que es contemplaven.

En referència al procés d'avaluació de les diferents matrius de decisió del SCLD_SS, es va dur a terme un estudi de simulació per poder contemplar el màxim de situacions possibles. Per dur a terme aquest estudi de simulació d'una manera objectiva i estandarditzada, es va utilitzar el protocol Benchmark, que proporcionava un marc de referència per la comunitat científica. No obstant, el model de planta d'aquest protocol no contemplava la variabilitat de les condicions de sedimentació del fang, per la qual cosa va ser necessari introduir-hi modificacions. Per poder avaluar correctament el SCLD_SS també es van modificar alguns dels índexs definits pel protocol Benchmark, així com també, se'n va introduir un de nou (CumED). En aquest capítol es mostra com és possible adaptar el protocol Benchmark segons els objectius que es pretenguin. Actualment existeixen gran quantitats d'articles científics que es basen en aquest protocol, adequant-lo als respectius estudis, com per exemple: modificant el model amb altres configuracions (Abusam *et al.*, 2001; Gernaey i Jorgensen, 2004), ampliant-lo amb la definició de nous índexs (Vanrolleghem i Gilliot, 2002; Comas *et al.*, 2005), amb noves configuracions per l'avaluació de disseny conceptual (Flores *et al.*, 2005), etc.

Els resultats de l'avaluació mitjançant l'estudi de simulació amb el model Benchmark, va permetre diferenciar quatre opcions de SCLD_SS amb millor comportament que les altres. Ara bé, l'avaluació no només es va limitar a un model estàndard, sinó que també es va realitzar un estudi de simulació amb el model de l'EDAR Granollers. Mentre que per una banda, l'ús de dades reals va aproximar més l'estudi de simulació a la realitat, per una altra, això va comportar no poder avaluar totes les situacions considerades en les matrius de decisió del SCLD_SS. Tanmateix, amb l'estudi de simulació amb el model de l'EDAR real es va comprovar que les quatre opcions proporcionaven bons resultats i que, per tant, fins a la seva implementació no es podria corroborar quina matriu responia millor a les condicions reals del procés.

Passar de treballar amb simulacions a estudiar el comportament del SCLD_SS a l'EDAR real comporta tenir en compte un seguit de restriccions no considerades en els estudis de simulació. És important dissenyar un sistema de control que, des d'un principi, s'ajusti a les característiques reals de l'EDAR per tal d'aconseguir un SCLD factible en la realitat. Amb tot, sovint apareixen situacions o imprevistos que no poden ser contemplats en els estudis previs a la implementació.

La utilització dels índexs d'avaluació definits en aquest capítol són aplicables tant en estudis de simulació com de validació en l'EDAR real, a excepció de l'índex CumED. Aquest índex no va ser utilitzat en la validació del SCLD_SS implementat, degut a la manca d'instrumentació en línia per mesurar les variables necessàries pel seu càlcul.

Per una altra banda, l'ús dels índexs comparatius de l'estudi de simulació no és extrapolable a l'estudi de validació del sistema de control a l'EDAR real, ja que la variabilitat del cabal i composició de l'entrada a l'EDAR de Granollers no és la mateixa cada dia, de manera que no es poden comparar d'una manera rigorosa i quantitativa dues situacions idèntiques amb una o altra estratègia de recirculació (Qrec CT i SCLD_SS).

Durant la setmana de validació del SCLD_SS a l'EDAR Granollers, no es van produir totes les situacions contemplades en la matriu de regles, per la qual cosa no es va poder avaluar d'una manera completa el comportament del sistema de control. Tot i així, els resultats de la validació verifiquen el bon funcionament del SCLD_SS obtingut en l'estudi de simulació.

La interfície d'usuari dissenyada per aquest sistema de control permet la configuració dels rangs de valors de les variables i de les seves funcions de pertinença, de manera que en qualsevol moment, el cap de planta pot ajustar el SCLD_SS si ho creu convenient. Per exemple, si el cabal d'entrada a l'EDAR es veu incrementat amb el pas del temps, la definició de la variable difusa Qen en les etiquetes 'Alt', 'Normal' i 'Baix' pot ser modificada a criteri del responsable de la instal·lació.

La extrapolació d'aquest SCLD_SS a altres EDAR urbanes és podria dur a terme seguint el mateix procediment que en aquest capítol. No obstant, la definició de les variables del sistema de control així com de la matriu de decisió dependrà de la instrumentació disponible i de les característiques específiques (tant tècniques com de procés) de l'EDAR on es vulgui implementar.

**SISTEMA DE CONTROL BASAT EN LÒGICA DIFUSA PER L'ELIMINACIÓ
BIOLÒGICA DEL NITROGEN DE L'EDAR TARADELL**



V. SISTEMA DE CONTROL BASAT EN LÒGICA DIFUSA PER L'ELIMINACIÓ BIOLÒGICA DEL NITROGEN DE L'EDAR TARADELL

V.1. PRESENTACIÓ

Les EDAR estan sotmeses a grans fluctuacions en el cabal i concentració de les aigües residuals rebudes, a més dels canvis de les condicions externes. Per tot això, és necessari treballar amb sistemes de control dinàmics sobre els processos de tractament que s'hi porten a terme. L'aeració, el temps de retenció dels fangs, la recirculació interna i l'addició externa d'una font de carboni han estat definits com a paràmetres de control per l'optimització en línia de l'eliminació biològica del nitrogen (EBNi) de sistemes de fangs activats (Fiter *et al.*, 2003). Respecte a l'aeració, com que la compressió de l'aire comporta un cost energètic elevat a més de ser el cost d'operació més gran d'una EDAR que vulgui eliminar biològicament el nitrogen, existeix un incentiu econòmic per tal de minimitzar el consum energètic de l'aeració, podent aconseguir una reducció d'aproximadament un 30% del cost energètic total (Olsson i Newell, 1999).

D'acord amb aquestes consideracions, es va proposar un SCLD per controlar l'EBNi a la vegada que es pretenia aconseguir un estalvi energètic de l'aeració d'una EDAR real, l'EDAR Taradell.

En aquest capítol es descriu en detall el procés de disseny i implementació d'un SCLD per l'eliminació biològica del nitrogen (SCLD_N) mitjançant la regulació de l'aeració. En l'apartat V.2, es plantegen els objectius de l'estudi. En el següent apartat, es descriu en detall la instal·lació on s'implementà el SCLD_N, l'EDAR Taradell. A continuació es van definir un conjunt d'índexs per tal d'avaluar i comparar, d'acord amb els objectius preestablerts, l'eficàcia de l'estratègia d'aeració resultant del SCLD_N respecte altres estratègies d'aeració (apartat V.4). Aquests índexs van ser índexs de procés del protocol Benchmark (Copp, 2002) amb diverses modificacions per adequar-los a aquest estudi.

Un cop determinats els objectius, estudiada l'EDAR i definits els índexs d'avaluació, aquest capítol, a l'igual que l'anterior, es diferencia en dues grans etapes: a) disseny (apartat V.5) i b) implementació (apartat V.6).

a) **Disseny del SCLD_N:** el primer pas a realitzar a l'hora de dissenyar qualsevol sistema de control és la identificació i selecció de les variables que han de prendre part en la seva estructura, és a dir, les variables controlades, mesurades i manipulades (apartat V.5.1). Seleccionades les variables, a continuació, en l'apartat V.5.2 es va descriure detalladament l'estructura del SCLD, incloent la definició de les funcions de pertinença per cadascuna de les variables, els operadors lògics per la composició, el mètode d'inferència i el mètode de defuzzificació escollit. En aquest mateix apartat també s'explica el desenvolupament de la base de regles, que va resultar en la proposició de dues versions del SCLD_N, ambdues basades en aconseguir el procés de Nitrificació / Desnitrificació Simultània (NDS) per eliminar el nitrogen. L'última etapa del disseny del SCLD_N va consistir en la seva avaluació, duta a terme mitjançant un estudi de simulació amb el model de l'EDAR Taradell, explicat en l'apartat V.5.3. A diferència del capítol anterior, aquest estudi no es va realitzar

amb el model de l'EDAR Benchmark sinó amb el model de l'EDAR real, ja que l'EDAR tipus del Benchmark diferia significativament de la configuració real de l'EDAR Taradell. Es van mantenir l'ús dels tres escenaris estàndards de l'afluent (adaptats a l'escala de l'EDAR Taradell) i l'avaluació de l'eficàcia de les diferents estratègies d'aeració segons el protocol Benchmark. Mitjançant l'estudi de simulació i el càlcul dels índexs prèviament definits, es van avaluar i comparar les dues opcions de SCLD_N amb altres estratègies d'aeració.

b) Implementació del SCLD_N: finalitzada l'etapa de disseny del SCLD_N, es va procedir a la seva implementació a l'EDAR Taradell. Per poder adaptar el SCLD_N, va ser necessari conèixer les limitacions tècniques i d'operació de l'EDAR (apartat V.6.1). A més, es va dissenyar una aplicació per l'usuari amb la que es permetia accedir i modificar fàcilment el sistema de control (apartat V.6.2). Un cop implementat, es va dur a terme la seva validació, els resultats de la qual es presenten en l'apartat V.6.3.

Per acabar, es presenta una discussió sobre el treball realitzat en aquest capítol, des del disseny del SCLD_N fins la seva implementació i validació a l'EDAR Taradell (apartat V.7).

V.2. OBJECTIUS

L'objectiu principal d'aquest estudi es basa en el disseny i la implementació d'un SCLD a l'EDAR Taradell per tal de:

- minimitzar l'impacte del nitrogen al medi receptor i
- optimitzar el consum energètic de l'aeració.

Per aconseguir-ho, es van concretar els següents objectius parcials:

1. Caracterització de l'EDAR Taradell.
2. Definició d'índexs d'avaluació que permetin quantificar l'eficiència del SCLD d'acord amb els objectius establerts prèviament, en l'estudi de simulació i en la validació real.
3. Disseny del SCLD per controlar el nitrogen a l'efluent (SCLD_N). Aquest disseny implica la identificació i definició de les variables, el desenvolupament de la matriu de decisió i l'especificació dels mètodes de composició, inferència i defuzzificació del sistema de control.
4. Avaluació per simulació del funcionament del SCLD_N i comparació amb altres estratègies de control.
5. Implementació del SCLD_N a l'EDAR Taradell. Aquesta implementació inclou el desenvolupament del programa informàtic del sistema de control, el disseny d'una interfície gràfica per l'usuari i la integració del SCLD_N al funcionament general de l'EDAR.
6. Validació i discussió del funcionament del SCLD_N implementat.

V.3. L'EDAR TARADELL

L'EDAR Taradell va ser la instal·lació on es va implementar i validar el SCLD_N que es presenta en aquest capítol. A continuació s'explica en detall la seva configuració, la caracterització de l'entrada, el monitoratge i l'operació del procés i finalment, els rendiments d'eliminació que s'aconsegueixen.

V.3.1. Descripció de l'EDAR Taradell

L'EDAR Taradell es troba situada a la Conca del riu Ter en una zona declarada sensible. Això fa que, a més de la l'eliminació de Sòlids en Suspensió (SS) i Matèria Orgànica (MO), la planta hagi de complir amb les especificacions corresponents a l'eliminació de nutrients. L'EDAR va ser dissenyada per un cabal de 2000 m³·d⁻¹, que correspon a una població equivalent de 12000 habitants.

Les aigües residuals a tractar són d'origen urbà amb component industrial provinent del sector alimentari (escorxador, petites empreses d'embotits, de congelats...). Les característiques tècniques de disseny es presenten a la taula 5.1.

Taula 5.1. Característiques tècniques de disseny de l'EDAR de Taradell.

CARACTERÍSTIQUES DE DISSENY	
Població servida	8000
Població equivalent	12000 h.-e.
Cabal mig de disseny	2000 m ³ /d
Cabal màxim	5000 m ³ /d
DBO ₅ de l'aigua bruta	350 mg/L
DBO ₅ de l'aigua tractada	< 25 mg/L
SS de l'aigua bruta	345 mg/L
SS de l'aigua tractada	< 35 mg/L
Superfície total	0.65 ha
Potència instal·lada	100 Kw

El procés d'aquesta EDAR és de tipus biològic amb un sistema de fangs activats d'aeració prolongada. La configuració de l'EDAR permet l'eliminació biològica de la MO i el Nitrogen (N). No obstant, l'eliminació del P no pot realitzar-se biològicament, de manera que es duu a terme per via físico-química mitjançant l'addició de clorur fèrric. La figura 5.1 presenta el diagrama de procés de la línia d'aigua i de fangs de l'EDAR Taradell.

La línia d'aigua consta de pretractament, que inclou un pou de gruixuts inicial, seguit d'un desbast de fins mitjançant una reixa del tipus "Step-Screen" i un tamís estàtic "Hidranet". A continuació, l'aigua és enviada al reactor biològic, dividit en dues línies. Cada línia consta d'un carrousel d'oxidació (amb aeració per difusors) de 1092 m³ i d'un tanc anòxic previ al carrousel de tipus mescla completa amb un volum de 220 m³. Es recircula un cabal constant de 2880 m³·d⁻¹ des del carrousel a la cambra anòxica de cada línia. Finalment l'aigua és enviada cap a dos decantadors secundaris circulars que tenen un volum de 311 m³ respectivament. La línia de fangs consta

d'una unitat d'espessiment per gravetat i deshidratació per filtres banda. El fang sec és abocat a una planta de compostatge.

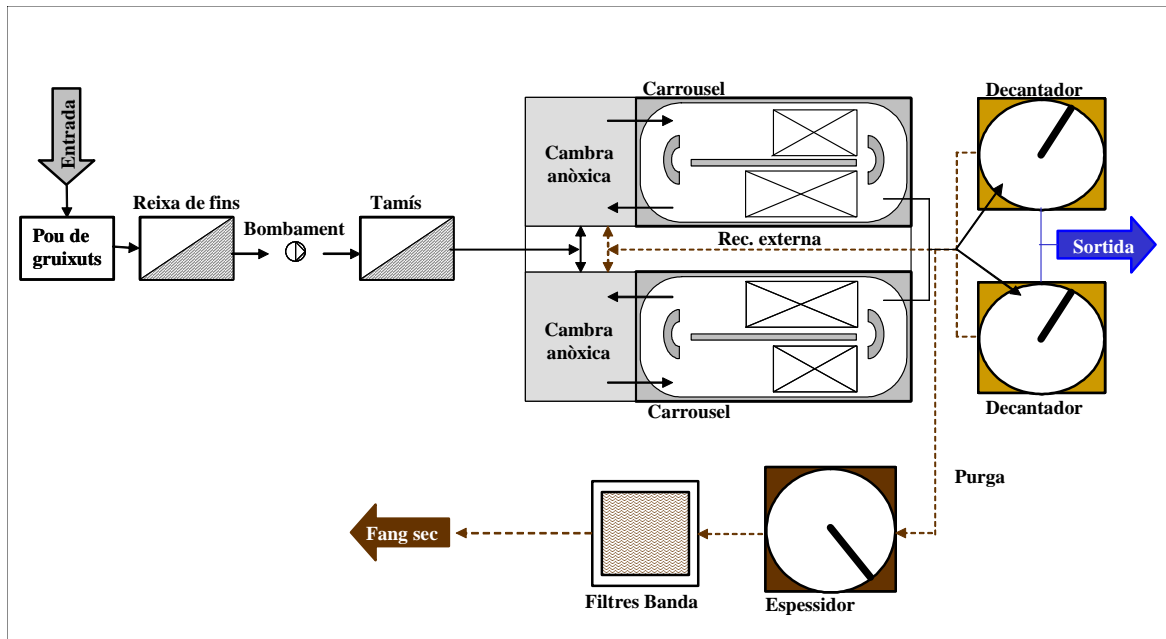


Figura 5.1. Esquema del diagrama de procés de l'EDAR de Taradell.

La figura 5.2 mostra diverses imatges de l'EDAR Taradell amb els dos carrousel d'oxidació i un dels decantadors secundaris.



Figura 5.2. Fotografies de l'EDAR Taradell amb els dos carrousel, el decantador secundari de la línia 2 i la caseta on hi ha part del pretractament (bombeig de capçalera i tamís) i de la línia de fangs (filtres banda)

V.3.2. Caracterització de l'aigua d'entrada de l'EDAR Taradell.

Les concentracions típiques de l'aigua d'entrada de l'EDAR Taradell es troben enumerades a la taula 5.2. Aquests valors han estat obtinguts de l'anàlisi estadístic dels registres històrics durant l'any 2004.

L'aigua residual que arriba a l'EDAR de Taradell presenta el perfil típic diari d'una EDAR urbana, amb variacions de cabal que coincideixen amb els hàbits de la població. El cabal mig diari d'entrada és, en condicions normals (sense períodes de pluges), aproximadament el cabal mig de disseny.

Taula 5.2. Descriptors bàsics estadístics de les característiques de l'aigua d'entrada de l'EDAR Taradell (any 2004).

Paràmetres	Mitjana	Desviació Estàndard	Mín.	Màx.
Cabal entrada ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	2036	846.5	1111	3716
pH	7.98	0.13	7.79	8.16
Conductivitat ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	2703	632.6	1791	3702
DQO ($\text{g O}_2 \cdot \text{m}^{-3}$)	583	199	312	963
DBO ($\text{g O}_2 \cdot \text{m}^{-3}$)	225	81.2	126	366
SS ($\text{g SST} \cdot \text{m}^{-3}$)	229	87.7	121	434
TKN ($\text{g N} \cdot \text{m}^{-3}$)	60.7	20.7	31.7	94.8
NH_4^+ ($\text{g N} \cdot \text{m}^{-3}$)	43.1	16.2	22.1	70.8
P-Total ($\text{gP} \cdot \text{PO}_4^{3-} \cdot \text{m}^{-3}$)	8.7	2.48	5.2	12

En l'exemple de la figura 5.3, el cabal d'entrada mig és de $1812 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. El mínim de cabal es produeix normalment entre les 3 i les 6 de la matinada amb valors aproximadament del 45% del cabal mig. A partir de les 6:00h el cabal va augmentant arribant al seu valor màxim cap a les 10:00h. Aquest pic excedeix entre un 35 – 45% el cabal mig en condicions normals i fins el 200% en casos extrems (períodes de pluges i tempestes). El cabal mig representa un temps de retenció hidràulic al reactor d'unes 18 hores.

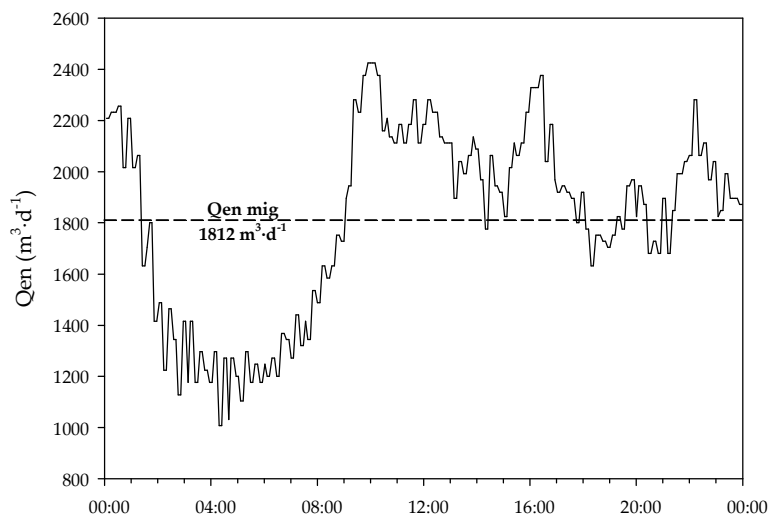


Figura 5.3. Perfil típic diari del cabal d'entrada de l'EDAR Taradell d'un dia laboral (29 de juny de 2004).

La diferència de perfil de cabal entre dies laborals i festius no és molt acusada. En l'exemple de la figura 5.4 s'observa com el perfil es va repetint diàriament sense que hi hagi una diferència important entre els dies laborals i el dia 24 de juny (festiu) ni el cap de setmana, amb excepció del pic del diumenge 27 de juny degut a la pluja.

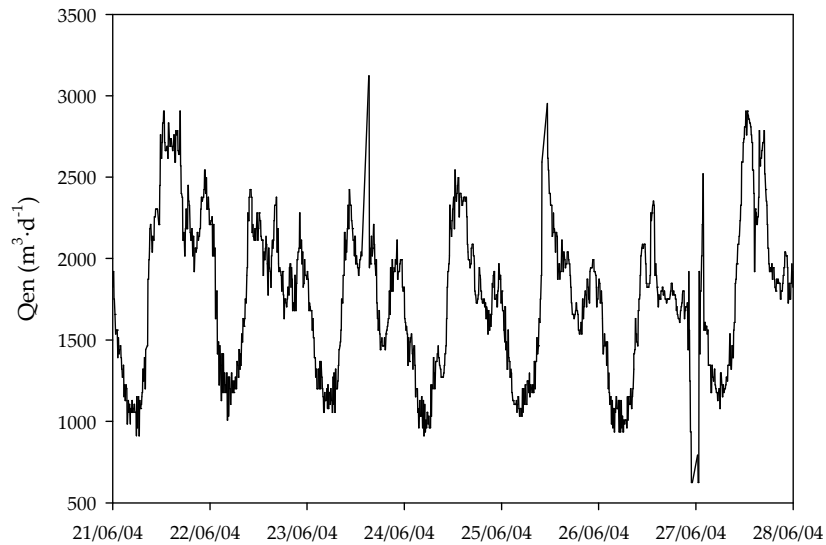


Figura 5.4. Perfil setmanal del cabal d'entrada de l'EDAR Taradell (del 21 al 27 de juny de 2004).

La variabilitat de cabal diari a l'EDAR Taradell està directament relacionat amb el règim de pluges de la zona. Aquesta EDAR rep, en períodes de pluja, gran quantitat de cabal provinent d'escorrenties que pot arribar a duplicar el cabal mig de disseny de la instal·lació. En la figura 5.5 es mostra la relació entre les pluges mensuals durant l'any 2004 fins el juny del 2005 i el cabal mig d'entrada mensual a l'EDAR. S'observa com existeix una relació directa entre increment de cabal d'entrada i increment de pluges i viceversa.

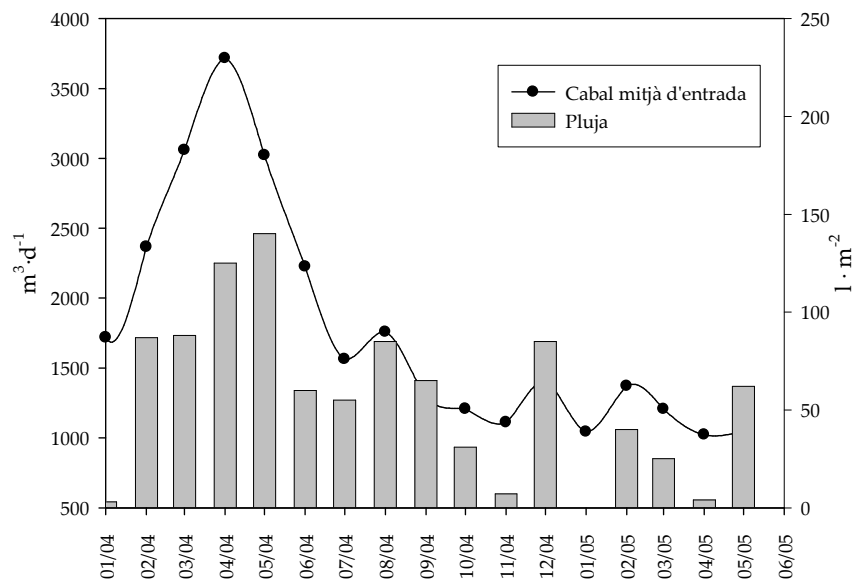


Figura 5.5 Perfil l'any 2004 fins juny 2005 on es relaciona la variabilitat mensual del cabal mitjà tractat a l'EDAR Taradell amb la pluja enregistrada de cada mes (dades proporcionades pel Servei Meteorològic de Catalunya).

V.3.3. Monitoratge de l'EDAR Taradell

La taula 5.3 presenta resumida tota la informació quantitativa disponible en l'EDAR Taradell, diferenciant la font de mesura per cada variable i el punt de mostreig. El seguiment analític que es duu a terme a l'EDAR Taradell es basa en la recollida de mostres compostes diàries dos cops per setmana amb excepció de la DV30 (test V30 diluïda) que es mesura cada dia.

Taula 5.3. Dades quantitatives mesurades a l'EDAR Taradell.

Font	Paràmetres	Símbols	Ref. Mètode	Punt de mostreig
Analítica	Demanda Químic d'Oxigen	DQO	UNE-EN 77004	Afluent i Efluent
	Demanda Biològica d'Oxigen	DBO ₅	*Std. Met. 5210B	
	Sòlids en Suspensió Totals	SST	UNE-EN 872	
	Amoni	NH ₄ ⁺	UNE-EN 77028	
	Nitrogen Kjeldhal Total	NKT	UNE-EN 25663	
	Fòsfor Total	P _t	UNE-EN 1189	
	Conductivitat	Cond.	UNE -EN 27888	
	Nitrits / Nitrats	NO ₂ /NO ₃ ⁻	*Std. Met. 4110C	Efluent
	Sòlids en Suspensió del Licor Mescla	SSLM	UNE-EN 872	Reactors biològics i Recirculació externa
	Sòlids en Suspensió Volàtils del Licor Mescla	SSLMV	UNE-EN 872	
V30 diluïda	DV30	-		
Alçada de fangs	AF	-	Decantadors secundaris	
Sensors	pH	pH	M. Electromètric	Afluent
	Concentració d'Oxigen dissolt	OD	M. Electromètrics	Reactors biològics
	Potencial d'Òxido - Reducció	ORP		
	Cabal	Q	M. Electromagnètic	Afluent

*Standard Methods for the examination of water and wastewater (APHA et al., 1998)

Encara que l'EDAR disposa de sensors, no es té un registre històric dels valors en continu a temps real que mesuren. La ubicació dels d'OD i ORP es troba representada en la figura 5.6.

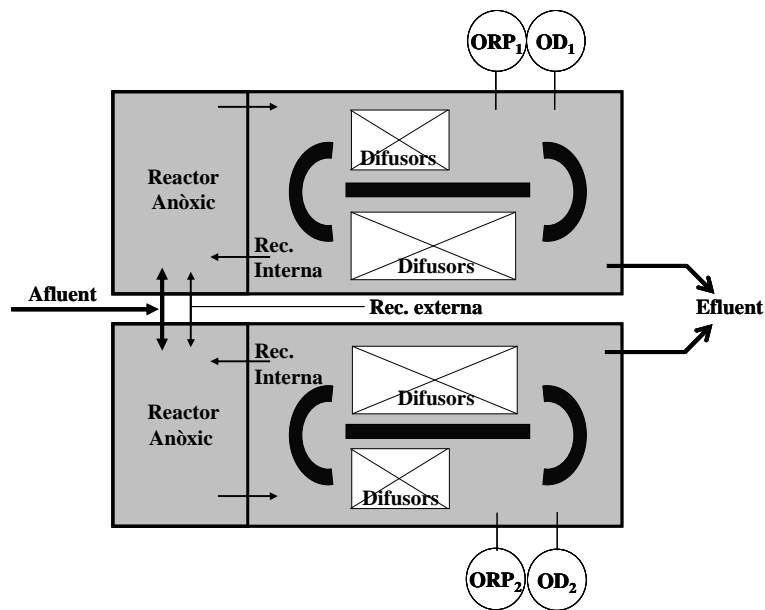


Figura 5.6. Esquema dels reactors biològics de l'EDAR Taradell amb la situació dels sensors d'OD i ORP.

V.3.4. Operació de l'EDAR Taradell

La regulació dels principals llaços de control a l'EDAR Taradell és duta a terme mitjançant engedades i aturades temporitzades:

1. Purga: es purga des dels decantadors mitjançant un temporitzador, que posa en marxa una bomba els primers cinc minuts de cada hora, purgant un cabal de $960 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$.
2. Recirculació de fangs activats: la recirculació també és duta a terme de manera temporitzada, de les 00:00 a les 8:00 hores es recircula un cabal de $960 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ i la resta del dia, un cabal de $1920 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$.
3. Aeració: l'aeració en els carrousel d'oxidació de l'EDAR Taradell és proporcionada mitjançant difusors de bombolla fina, amb la disposició que es presenta en la figura 5.6. Encara que existeixen dues graelles de difusors diferents en un mateix carrousel, el cabal d'aire només pot ser aportat de manera simultània, és a dir, no es pot proporcionar cabal d'aire en una de les graelles i a l'altra no. Existeix un bufador per cada línia, el qual, prèviament a l'estudi que es presenta en aquesta tesi, treballava a unes 1115 rpm quan estava en funcionament. Abans de la implementació del SCLD_N, l'EDAR Taradell va operar amb diferents estratègies d'aeració. Fins al maig del 2001 es va treballar amb un llaç de control automàtic d'engedada - aturada (control ON / OFF) segons valors de consigna de l'OD (introduïts manualment) que proporcionava bons rendiments d'eliminació de matèria orgànica però rendiments baixos d'eliminació de nitrogen degut a una desnitrificació parcial del nitrogen nitrificat. A partir del juny del 2001 es va passar a funcionament manual degut a una avaria de l'autòmat de la instal·lació i es va iniciar l'operació de l'aeració intermitent mitjançant un temporitzador (amb intervals d'un quart d'hora) segons el criteri del cap de planta. Des de l'any 2003 fins la implementació del SCLD_N, les engedades i aturades de l'aeració van ser controlades a partir de valors de

referència d'OD i d'ORP dels carrousels d'oxidació amb l'objectiu d'aconseguir una aeració intermitent que completés el procés de desnitrificació parcial que es produïa en els reactors anòxics. Aquesta estructura de control de l'aeració intermitent funcionava de la següent manera:

- dues consignes per ORP a partir de les següents regles heurístiques:
 - SI "ORP = 180 mV" LLAVORS "Aturar aeració"
 - SI "ORP = 20 mV" LLAVORS "Engegar aeració"

- dues consignes per l'OD quan l'aeració estava engegada, a partir de les següents regles heurístiques:
 - SI "OD = 3 gO₂·m⁻³" LLAVORS "Aturar aeració"
 - SI "OD = 0.5 gO₂·m⁻³" LLAVORS "Engegar aeració"

Aquest sistema també comptava amb uns valors de seguretat: un temps màxim d'aeració (60 minuts) i de no aeració (40 minuts). Treballar amb aquesta estratègia d'aeració intermitent va proporcionar bons rendiments d'eliminació de matèria orgànica i de nitrogen, tal i com s'aprecia a la taula 5.4. Ara bé, l'operació de l'aeració mitjançant aquesta estratègia no havia estat ajustada per minimitzar el seu consum energètic.

V.3.5. Rendiments d'eliminació de l'EDAR Taradell.

La taula 5.4 resumeix els rendiments d'eliminació de l'EDAR Taradell durant l'any 2004.

Taula 5.4. Mitjanes mensuals de rendiments d'eliminació de SS, MO i nutrients juntament amb el cabal tractat de l'EDAR Taradell durant l'any 2004.

	Cabal tractat (m ³ ·d ⁻¹)	Rendiments d'eliminació (any 2004)				
		SS (%)	DQO (%)	DBO5 (%)	Ntotal (%)	Ptotal (%)
gener	1717	97.8	93.5	98.8	90	85.4
febrer	2366	97.0	92.2	98.8	88.4	89.1
març	3058	96.8	91.6	98.3	64.9	85.9
abril	3716	93.7	88.0	97.4	83.8	86.8
maig	3021	89.5	88.4	96.5	79.7	89.0
juny	2225	92.7	92.2	98.6	82.6	79.2
juliol	1562	91.6	91.6	98.3	92.1	77.3
agost	1758	97.5	90.6	98.9	92.9	87.6
setembre	1288	97.2	94.3	99.5	96.1	81.3
octubre	1206	97.0	93.1	99.4	97.7	84.5
novembre	1111	96.8	95.9	99.3	95.7	85.1
desembre	1408	91.5	88.5	98.9	89.6	95.1
Mitjana	2036	94.9	91.7	98.6	87.8	85.5

El cabal tractat durant aquell any va ser molt variable (figura 5.5) amb valors de cabal mig mensual superiors al cabal mig de disseny durant els mesos de febrer a juny. No obstant, els rendiments d'eliminació de SS, DQO i DBO₅ es mantenen en percentatges molt elevats durant tot l'any. El percentatge de reducció de la DBO₅ no es troba mai per sota del 95% mentre que els rendiments de SS i DQO es mouen entre el 88 – 97%. Per contra, amb els resultats d'eliminació del nitrogen s'observa una disminució del seu rendiment durant els mesos de més cabal, obtenint els pitjors resultats en el mes de març, amb un rendiment del 64,9%. No obstant, el rendiment d'eliminació del nitrogen durant l'any 2004 és bo, amb un 87,8% de mitjana anual. Respecte l'eliminació físico-química del fòsfor els rendiments varien entre el 77 i el 95%, obtenint una mitjana anual del 85,5%, un percentatge d'eliminació correcte.

V.4. ÍNDEXS D'AVUACIÓ

A la taula 5.5 s'enumeren els índexs que es van utilitzar per avaluar l'eficàcia del SCLD_N respecte els objectius que s'havien d'assolir.

Els índexs emprats per l'avaluació de l'impacte a medi receptor van ser tres:

- Qualitat de l'Efluent (QE)
- Qualitat de l'Efluent segons el Nitrogen (QE_N)
- Temps de Violació del límit legal del Nitrogen a l'efluent (TV_N)

Els dos índexs primers fan referència a la qualitat de l'efluent. L'índex QE es refereix a la qualitat de l'efluent de manera general, tenint en compte SS, MO i N, mentre que l'índex QE_N només fa referència a la qualitat de l'efluent segons el N. L'índex QE és l'índex de procés "Effluent Quality" definit pel protocol Benchmark (Copp, 2002) i l'índex QE_N és una modificació d'aquest índex de procés per limitar-lo només al nitrogen. El tercer dels índexs, TV_N, fa referència al temps en que es supera el límit legal del nitrogen de l'efluent i és un dels índexs "Effluent violations" del protocol Benchmark.

Respecte la quantificació del consum energètic, es van definir tres índexs més:

- Consum Energètic per l'Aeració (CEA)
- Consum Energètic per l'Aeració segons cabal d'entrada (CEA_Q)
- Consum Energètic per l'Aeració segons càrrega d'entrada (CEA_{O₂})

L'índex CEA, és l'índex de procés "Aeration Energy" del protocol Benchmark, on es calculen els kW·h diaris consumits per l'aeració del procés. A partir d'aquest índex, es van desenvolupar dos índexs més, CEA_Q i CEA_{O₂} per relacionar el consum de l'aeració amb el cabal d'entrada i la càrrega d'entrada respectivament.

Taula 5.5. Relació dels índexs utilitzats per quantificar el nivell d'assoliment dels objectius fixats.

Objectiu específic	Índexs d'Avaluació		
	Descripció	Símbol	Unitats
Impacte a medi receptor	Qualitat de l'Efluent	QE	kg contam. · d ⁻¹
	Qualitat de l'Efluent segons el Nitrogen	QEN	kg N · d ⁻¹
	Temps de Violació del límit legal d'abocament del Nitrogen	TV _N	%
Consum energètic	Consum Energètic de l'Aeració	CEA	kW·h · d ⁻¹
	Consum Energètic de l'Aeració segons cabal d'entrada	CEA _Q	kW·h · m ⁻³
	Consum Energètic de l'Aeració segons càrrega d'entrada	CEA _{O2}	kW·h · kg DQO ⁻¹

Tots els índexs relacionats amb quantificar l'impacte a medi receptor, van ser utilitzats en els estudis de simulació dels SCLD_N. No obstant, durant la validació de la implementació del sistema de control a l'EDAR Taradell no es van utilitzar els índexs associats a l'impacte en medi receptor a causa de dificultat d'obtenir les dades necessàries per al càlcul de cadascun d'ells. Els valors dels paràmetres SST, DQO, DBO₅, NKT i NO_x, només s'analitzen al laboratori de manera puntual de manera que no es té un registre en continu que permeti calcular els índexs QE, QEN i TV_N. En lloc d'aquests índexs, es va fer ús del seguiment analític que realitzava el personal de l'EDAR per controlar la qualitat de l'efluent.

Pel que fa als índexs de consum energètic, mentre que durant la validació real del SCLD_N es van utilitzar els tres índexs (CEA, CEA_Q i CEA_{O2}), en l'estudi de simulació només es va calcular l'índex CEA, ja que els cabals i composicions de l'entrada simulats per cada estratègia d'aeració a comparar eren sempre els mateixos. Per acabar, cal tenir present que l'ús dels índexs de consum energètic ha d'estar sempre lligat al rendiment d'eliminació de l'EDAR, ja que no té cap transcendència aconseguir un estalvi energètic de l'aeració si els rendiments d'eliminació són baixos i no es compleix la normativa d'abocament.

V.4.1. Índex d'avaluació de la Qualitat de l'Efluent, QE.

Aquest índex és l'índex 'Quality Effluent' del protocol Benchmark (Copp, 2002), explicat en detall i definit per l'equació 3.5 de l'apartat III.3.5.1, on es descriuen els índexs de procés definits pel protocol Benchmark. L'índex de Qualitat de l'Efluent QE quantifica en un sol terme la càrrega contaminant de l'efluent sobre medi receptor, a partir dels paràmetres de SST, DQO, DBO₅, NKT i NO₃⁻ de l'efluent.

V.4.2. Índex d'avaluació de la Qualitat de l'Efluent segons el Nitrogen, QEN.

L'índex QEN té com objectiu avaluar la qualitat de l'efluent segons els kg de Nitrogen que s'aboquen al dia. QEN es calcula integrant la concentració de Nitrogen total de l'efluent (N_e) pel cabal de l'efluent (Q_e) al llarg del temps, segons l'equació 5.1.

$$QE_N = \frac{1}{t \cdot 1000} \int_{t_0}^t N_e \cdot Q_e dt \quad (5.1)$$

On: QE_N en unitats de $\text{kg N} \cdot \text{d}^{-1}$

N_e en unitats de $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

Q_e en unitats de $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

t és el temps en que s'avalua el procés, en unitats de dies.

Quant més baix sigui el valor de QE_N millor funciona el procés, és a dir, menys quantitat de nitrogen és abocada a medi receptor.

V.4.3. Índex d'Avaluació del Temps de Violació del límit legal de Nitrogen a l'efluent, TV_N .

L'índex TV_N és una mesura del percentatge del temps que l'EDAR està per sobre de la llei respecte l'abocament de nitrogen total al medi receptor. Segons la Directiva 91/271/CEE el límit d'abocament és de $15 \text{ gN} \cdot \text{m}^{-3}$ en EDAR més petites de 100.000 h.-e, com és l'EDAR Taradell. Per tant, el temps de violació d'aquest índex serà aquell en que la planta estigui abocant per sobre d'aquest valor. TV_N va ser definit pel protocol Benchmark tant pel nitrogen com pels altres paràmetres d'abocament amb límit legal (SST , DBO_5 , DQO , i P_{total}).

Les unitats d'aquest índex és un percentatge respecte el temps total en que s'avalua el procés, i es calcula segons l'equació 5.2.

$$TV_N = \frac{N_N}{N_T} \cdot 100 \quad (5.2)$$

On: TV_N en unitats de %

N_N és el temps en que la planta no està complint el límits legal d'abocament en nitrogen, en unitats de dies.

N_T és el temps total d'avaluació, en unitats de dies.

Si TV_N és zero significa que, segons tots els registres que es tenen de nitrogen a l'efluent, en cap moment s'ha incomplert la normativa d'abocament, per tant, quant més baix sigui el valor d'aquest índex, millor funciona el procés.

V.4.4. Índex d'avaluació del Consum Energètic de l'Aeració, CEA.

Mitjançant l'índex CEA es calcula quin és el consum energètic degut l'aeració. Aquest índex és una modificació de l'índex 'Aeration Energy' del protocol Benchmark (Copp, 2002) i es calcula segons l'equació 5.3.

$$CEA = \frac{1}{t} \int_{t_0}^t EA \cdot dt \quad (5.3)$$

On: CEA en unitats de $\text{Kw} \cdot \text{h} \cdot \text{d}^{-1}$

t és el temps en que s'avalua el procés, en unitats de dies.

EA és l'energia d'aeració, en unitats de Kw·h, que en els estudis de simulació, s'obté directament a través de l'equació 5.4 que utilitza el programa GPS-X (Hydromantis,2003b) i que en l'EDAR real correspon al consum registrat dels bufadors.

$$EA = \frac{Q_{aire} \cdot h_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}}{e_{buf} \cdot 86.4 \cdot 10^6} \quad (5.4)$$

On: Q_{aire} és el cabal d'aire proporcionat, en unitats de $m^3 \cdot d^{-1}$

h_{H_2O} és l'alçada de la columna de l'aigua, en unitats de m.

86.4×10^6 és un factor de conversió per ajustar unitats: $\frac{J}{d} \cdot \frac{W \cdot h}{3600J} \cdot \frac{1d}{24h} = \frac{W}{86400} = \frac{KW}{86.4 \cdot 10^6}$

ρ_{H_2O} és la densitat de l'aigua, en unitats de $N \cdot m^{-3}$

e_{buf} és l'eficiència del bufador, adimensional.

Quant més baix sigui el valor de CEA menys consum d'energia, i per tant, millora del procés respecte l'optimització energètica.

Per calcular l'índex CEA a l'EDAR Taradell, es registra directament els Kw·h consumits pel bufador diàriament. No obstant, a diferència dels estudis de simulació, no n'hi ha prou en calcular l'índex CEA per conèixer el consum energètic i poder comparar-lo en diferents dies. Mentre que en les simulacions, la càrrega d'entrada és sempre la mateixa i per tant es poden comparar valors de l'índex CEA, en l'EDAR real, és necessari relacionar el consum energètic de l'aeració amb els metres cúbics tractats (índex CEA_Q) i amb la càrrega d'entrada (índex CEA_{O_2}).

V.4.5. Índex d'avaluació del Consum Energètic de l'Aeració segons el cabal d'entrada, CEA_Q .

L'índex CEA_Q determina els Kw h consumits en un dia respecte els m^3 que s'han de tractar i es calcula segons l'equació 5.5.

$$CEA_Q = \frac{CEA}{Q_{en}} \quad (5.5)$$

On: CEA_Q en unitats de $Kw \cdot h \cdot m^{-3}$

CEA en unitats de $Kw \cdot h \cdot d^{-1}$

Q_{en} és el cabal d'entrada, en $m^3 \cdot d^{-1}$

Quant més baix sigui el valor de CEA_Q , menys energia s'haurà consumit per tractar un metre cúbic d'aigua residual. Aquest índex es pot utilitzar sempre i quan les condicions d'entrada de l'EDAR es trobin dins la normalitat, tenint en compte que es manté sempre un rendiment d'eliminació correcte i similar. Ara bé, quan es produeixen períodes de pluja aquest índex no és adequat, ja que el valor de CEA_Q disminuirà, però no serà representatiu ja que el cabal elevat d'aigua que entra en l'EDAR presentarà menys càrrega contaminant que un

dia normal. Per poder valorar i comparar també el consum energètic de l'aeració en aquestes situacions es va desenvolupar l'índex CEA_{O_2} .

V.4.6. Índex d'avaluació del Consum Energètic de l'Aeració segons la càrrega d'entrada, CEA_{O_2} .

L'índex CEA_{O_2} quantifica el consum energètic de l'aeració respecte la càrrega contaminant que entra a l'EDAR segons l'equació 5.6. En el cas de l'EDAR Taradell, aquesta càrrega contaminant va ser calculada com la suma de la DQO i l'Amoni (en unitats de DQO).

$$CEA_{O_2} = \frac{CEA}{Càrrega_{en}} \quad (5.6)$$

On: CEA_{O_2} en unitats de $Kw \cdot h \cdot Kg \text{ DQO}^{-1}$

CEA en unitats de $Kw \cdot h \cdot d^{-1}$

$Càrrega_{en}$ és la càrrega contaminant d'entrada, en unitats de $kg \text{ DQO} \cdot d^{-1}$ calculada com la suma de DQO i Amoni segons l'equació 5.7.

$$Càrrega_{en} = \frac{[(NH_4^+_{en} \times 4.57) + DQO_{en}]}{1000} \times Q_{en} \quad (5.7)$$

On: $Càrrega_{en}$ en unitats de $kg \text{ DQO} \cdot d^{-1}$

$NH_4^+_{en}$ és la concentració d'amoni d'entrada en unitats de $g \text{ N} \cdot m^{-3}$

4.57 és el factor de conversió de l'amoni en DQO, en unitats de $g \text{ DQO} \cdot g \text{ N}_{NH_4^+}^{-1}$

Q_{en} en unitats de $m^3 \cdot d^{-1}$

Quant més baix el valor de CEA_{O_2} , menys energia emprada per l'aeració per kg de DQO d'entrada.

V.5. DISSENY DEL SCLD_N

El disseny del SCLD_N es va dur a terme en tres etapes principals. En primer lloc, es van identificar i seleccionar les variables que havien de formar part del sistema: les variables controlades, mesurades i manipulades. Per realitzar aquesta selecció és imprescindible conèixer el procés a controlar, en aquest cas, l'EBNi així com les relacions que existeixen entre les diferents variables. Un cop determinades les variables, es va procedir a descriure el SCLD_N. És a dir, en un segon apartat es van definir les variables difuses del sistema de control, es van desenvolupar les regles 'Si-Llavors' i es va determinar el mètode d'inferència i defuzzificació que s'havia d'utilitzar per a la seva execució. L'última etapa del disseny del SCLD_N va consistir en la seva avaluació, duta a terme mitjançant un estudi de simulació amb el model de l'EDAR Taradell. A diferència que el capítol anterior, en aquest no es va utilitzar el model de la planta Benchmark, ja que la seva configuració de reactors difereix de la configuració dels de l'EDAR Taradell. No obstant, sí que es van utilitzar els escenaris predefinitos pel Benchmark de temps sec, pluja i tempesta adequats a l'escala de cabal i composició de l'EDAR Taradell. Les simulacions es van realitzar amb aquests escenaris en lloc d'utilitzar dades reals perquè no es disposava d'un registre en continu de valors de cabal i composició de l'entrada que permetés un estudi de simulació dinàmic en el temps. L'avaluació es va dur a terme mitjançant el càlcul dels índexs prèviament definits en l'apartat V.4, segons el

procediment utilitzat en el protocol Benchmark, explicat en detall en l'apartat III.3 del capítol de Materials i Mètodes.

V.5.1. Identificació i selecció dels components del SCLD_N

Per seleccionar les variables que han de formar part d'un sistema de control primer cal identificar-les en el procés a controlar i conèixer les seves relacions. El principal objectiu del SCLD_N és minimitzar la concentració de nitrogen de l'efluent, per la qual cosa, aquest paràmetre va ser definit com la variable controlada. Com s'ha dit anteriorment, l'aeració, el temps de retenció dels fangs, l'addició externa d'una font de carboni i la recirculació interna de nitrats són paràmetres de control utilitzats per l'optimització en línia de l'EBNi (Fiter *et al.*, 2003). En el cas de l'EDAR Taradell, es va escollir com a variable manipulada l'aeració. Per saber com manipular l'aeració per obtenir un efluent amb baixes concentracions de nitrogen, calia tenir informació que indiqués si l'aeració era insuficient, suficient o excessiva en un moment determinat. Actualment existeixen analitzadors que mesuren en continu la concentració d'amoni o de nitrats en el reactor biològic. Amb un instrument d'aquestes característiques a l'entrada i/o sortida del reactor, la variable mesurada podia ser directament el nitrogen i segons la seva concentració a l'entrada i/o sortida, s'augmentaria o disminuiria l'aeració. La figura 5.7 mostra un diagrama de blocs del control de la nitrificació amb mesures d'OD i amoni a la sortida del reactor. El punt de consigna de l'OD és determinat per la concentració d'amoni a la sortida del reactor (Olsson i Newell, 1999).

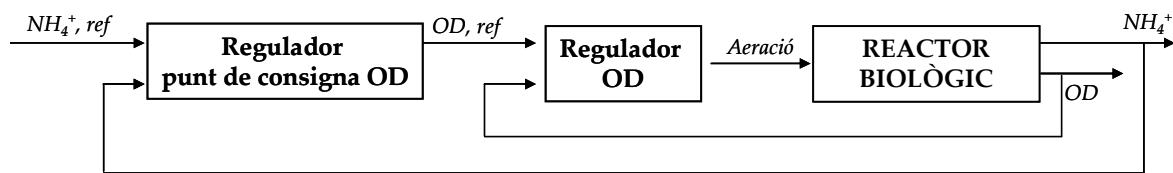


Figura 5.7. Diagrama de blocs d'un control de la nitrificació a partir de mesures d'amoni i OD (Olsson i Newell, 1999).

No obstant, aquest tipus d'esquemes de control requereixen la instal·lació de sondes avançades i cares. L'EDAR Taradell, com la majoria d'EDAR catalanes, no compta amb aquests tipus d'instrumentació. Per tant, cal buscar paràmetres indirectes del procés d'EBNi que siguin mesurables a l'EDAR Taradell, com per exemple, la concentració d'OD i l'ORP al reactor.

Relació de l'OD amb l'EBNi: en un reactor biològic airejat, l'oxigen és consumit per l'eliminació del carboni i pel procés de nitrificació. L'OD del reactor ha de ser suficientment elevat per garantir la nitrificació i així evitar la competència per l'OD entre els nitrificants i els heteròtrofs. Quant més càrrega de nitrogen entri al reactor, més OD es necessitarà per a la seva nitrificació. Per una altra banda, per a que es produeixi la desnitrificació és necessari aconseguir condicions anòxiques (concentracions d'OD per sota dels $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) i la presència de MO. L'OD és una variable clau en l'operació dels sistemes de fangs activats (Fiter *et al.*, 2002). Escollir els valors d'OD adequats no és una tasca trivial, ja que cal tenir en compte les diferents reaccions biològiques que es donen en un reactor (Olsson i Newell, 1999). Si, a més a més, es vol aconseguir la NDS, com és el cas del SCLD_N que es

desenvolupa en aquesta tesi, cal ajustar els valors d'OD de manera que siguin suficientment baixos per permetre la desnitrificació a la vegada que són suficients per garantir la nitrificació.

Relació de l'ORP amb l'EBNi: l'ORP és una mesura de l'estat oxidatiu en un sistema aquós que pot ser utilitzada per indicar-ne el seu estat biològic. En condicions anòxiques, l'ORP disminueix fins arribar a un punt d'inflexió (figura 5.8). Aquest punt és anomenat 'Nitrate Knee' i correspon al moment en que la concentració de nitrats i nitrats (NO_x^-) acumulats s'aproxima als $0 \text{ gN}\cdot\text{m}^{-3}$ (Paul *et al.*, 1998; Puig *et al.*, 2005).

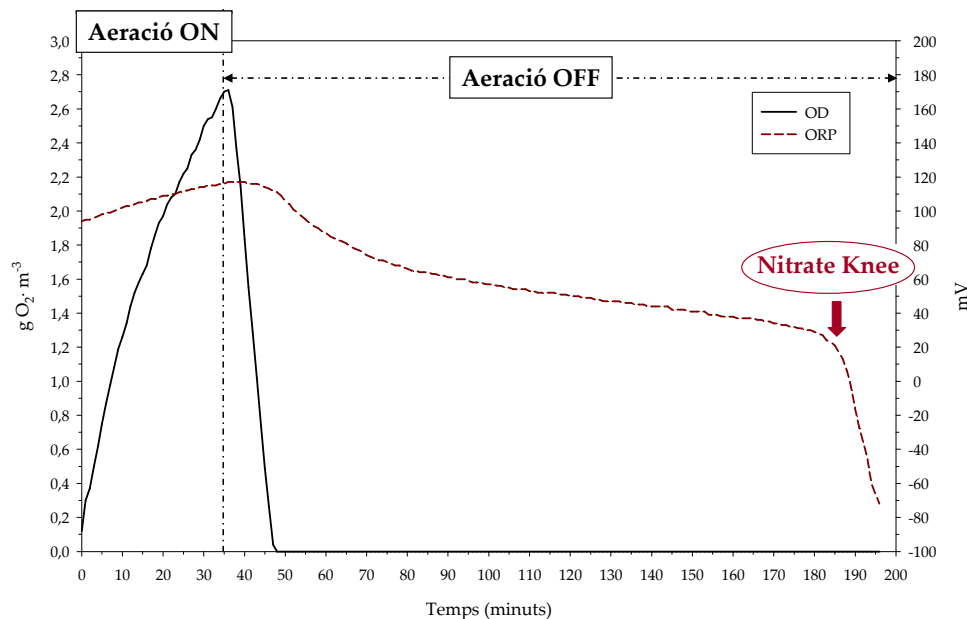


Figura 5.8. Evolució de l'OD i l'ORP durant un cicle d'engegada i aturada de l'aeració del dia 12/11/04.

La dinàmica de canvi de l'OD és molt més ràpida que l'ORP. A l'EDAR Taradell, l'OD respon molt ràpidament als canvis d'aeració ja que el sensor d'OD es troba situat després d'una graella de difusors (figura 5.6) mentre que l'ORP té una resposta més lenta. En el gràfic de la figura 5.8 s'observa com l'OD passa de $2,7$ a $0 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ en aproximadament 15 minuts des de l'aturada de l'aeració mentre que la disminució de l'ORP es molt més gradual, passant dels 120 mV als 20 mV en 150 minuts, quan es produeix l'anomenat 'Nitrate Knee' que indica el final de la desnitrificació. A la taula 5.6 s'enumeren les variables del SCLD_N per l'EDAR Taradell. En resum, aquest sistema controla el nitrogen a l'efluent mitjançant la variació de l'aeració segons els valors d'OD i ORP del reactor biològic.

Taula 5.6. Variables seleccionades per formar part del SCLD_N

Paràmetres del SCLD_N		
Variable controlada	Nitrogen a l'efluent	N_e
Variables mesurades	Oxigen Dissolt	OD
	Potencial d'Òxido-Reducció	ORP
Variable manipulada	Aeració	Aer

V.5.2. Descripció dels components i operadors del SCLD_N

Determinades les variables que formen part del sistema de control, cal definir-les en la nomenclatura dels sistemes de control basats en lògica difusa. Les variables mesurades (OD i ORP) són les variables d'entrada al SCLD_N. Els valors discrets d'aquestes variables han de ser fuzzificats per treballar en el sistema de control. Per tant, els valors numèrics de les mesures d'OD i ORP són traduïts a termes qualitius com 'Baix' 'Normal' 'Molt Alt'... amb un cert grau de pertinença de manera que s'obtenen els valors difusos. D'aquesta manera les variables d'entrada són variables lingüístiques. A continuació, mitjançant el procés d'inferència i en funció de la base de regles prèviament definida, s'obté una àrea difusa de sortida. El valor d'aquesta àrea de sortida difusa ha de ser defuzzificat per aconseguir l'acció de control desitjada, que en aquest cas és l'aeració. L'estructura d'aquest SCLD_N es troba esquematitzada en la figura 5.9.

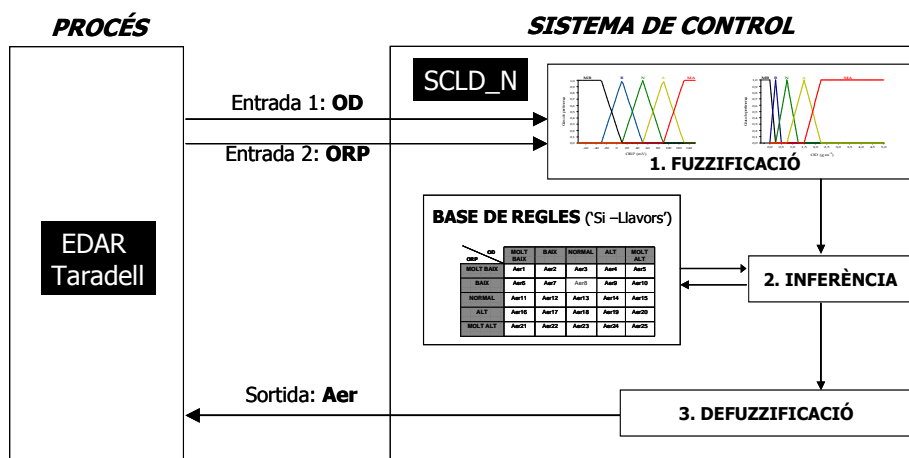


Figura 5.9. Estructura del SCLD_N.

Per construir el SCLD_N es van seguir quatre passos bàsics, (el procediment general d'aquests passos es troba explicat en detall en l'apartat III.1, on es descriu la metodologia de disseny i implementació d'un SCLD). Aquests passos consisteixen en la definició de les variables, la construcció de les regles 'Si-Llavors', la selecció dels operadors per la composició dels antecedents i el procés d'inferència i finalment, l'elecció del mètode de defuzzificació.

A l'igual que en el capítol IV, es va utilitzar la conjunció I amb l'operador mínim de Zadeh (Zadeh, 1973) per la composició, i la inferència es va dur a terme pel mètode MIN-MAX de Mamdani, on s'utilitza el mínim per la implicació i el màxim per l'agregació (Mamdani, 1975). Per la defuzzificació es va fer ús del mètode centroide (equació 1.15 de l'apartat I.2.4.10 del capítol I).

A continuació, en els dos següents apartats s'explica detalladament la definició de les variables d'entrada (OD, ORP) i de sortida (Aeració), i el desenvolupament de la base de regles 'Si-Llavors' que relaciona aquestes variables.

V.5.2.1. Definició de les variables difuses de SCLD_N

Definir les variables difuses d'OD, ORP i Aer. significa especificar l'univers de discurs (rangs de valors) de cadascuna d'elles, així com les etiquetes lingüístiques que les defineixen. És a dir, especificar el tipus de funcions de pertinença relacionades amb les etiquetes, la partició de l'univers de discurs en les diferents funcions definides, el grau de solapament entre elles i la seva simetria per cadascuna de les variables.

A l'igual que en el SCLD_SS, per la definició de les tres variables del sistema, es va decidir utilitzar funcions de pertinença del tipus triangular i pseudo-trapezoïdal als extrems (equacions 1.6 i 1.7 de l'apartat I.2.4.7 del capítol I) per la seva simplicitat de càlcul sense que fos en detriment de la fiabilitat del sistema (Cox, 1999).

Variable d'Entrada 1: OD

La definició d'aquesta variable va ser realitzada en funció de l'anàlisi dels valors històrics d'OD i tenint en compte el coneixement expert del cap de planta de l'EDAR Taradell així com l'objectiu del SCLD_N d'aconseguir la NDS en els carrousel d'oxidació. L'univers de discurs va ser limitat a un rang entre 0 i 5 gO₂·m⁻³. Es va decidir fer la partició de l'univers de discurs en cinc etiquetes lingüístiques: 'Molt Baix', 'Baix', 'Normal', 'Alt' i 'Molt Alt', per poder matisar suficientment la variabilitat de l'OD (Fiter *et al.*, 2005b).

En primer lloc es va definir el valor d'OD que havia de ser 'Normal' i al qual s'havia de tendir per aconseguir la NDS. Segons Trivedi i Heinen (2000) aquest valor ha de trobar-se entre 0.1 i 0.4 gO₂·m⁻³. Ara bé, atès que l'EDAR Taradell presentava un reactor anòxic a l'inici del tractament biològic, es va decidir augmentar el valor 'Normal' d'OD fins els 0.75 gO₂·m⁻³, per tal d'aconseguir una nitrificació completa i una desnitrificació parcial, que seria completada en el tanc anòxic previ al carrousel. D'aquesta manera també s'evitava possibles problemes de proliferació de filamentoses a causa de treballar amb valors d'OD baixos. Determinat el valor de l'etiqueta 'Normal', es van determinar la resta de valors que havien de tenir el 100% de pertinença a cada etiqueta lingüística, amb el següent resultat:

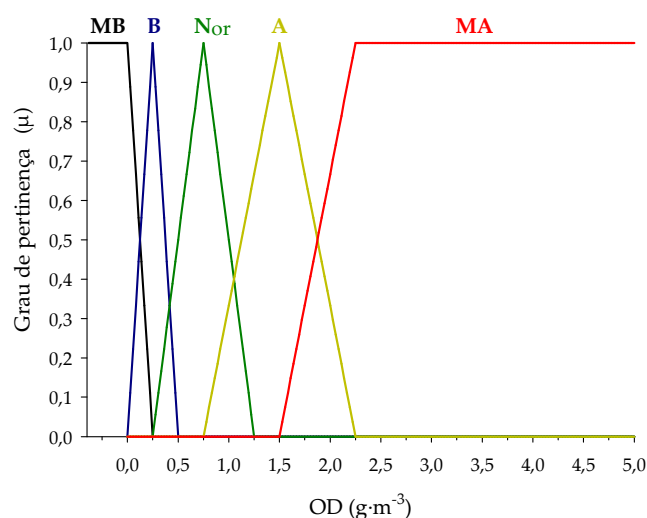
- 'Molt Baix' (MB): 0 g·m⁻³
- 'Baix' (B): 0.25 g·m⁻³
- 'Normal' (Nor): 0.75 g·m⁻³
- 'Alt' (A): 1.5 g·m⁻³
- 'Molt Alt' (MA): 2.25 g·m⁻³

A continuació, van definir-se les funcions de pertinença. Els extrems 'MB' i 'MA' van ser definits per funcions pseudotrapezoïdals, de manera que valors inferiors al punt màxim de certesa 'MB' o superiors al punt màxim de certesa 'MA' tenen sempre el 100% de pertinença. Les funcions restants van ser del tipus triangulars i simètriques, de manera que les dues vessants tinguessin la mateixa inclinació. La taula 5.7 defineix el suport i tipus de funcions de pertinença de cadascuna de les etiquetes lingüístiques de la variable difusa d'OD.

Taula 5.7. Definició de les funcions de pertinença de la variable difusa OD.

OD		Suport ($\text{gO}_2\cdot\text{m}^{-3}$)	Funció de pertinença
Molt Baix	MB	[0 0,25)	Funció pseudotrapezoïdal
Baix	B	(0 0,5)	Funció triangular
Normal	Nor	(0,25 1,25)	Funció triangular
Alt	A	(0,75 2,25)	Funció triangular
Molt Alt	MA	(1,5 5]	Funció pseudotrapezoïdal

En la figura 5.10 es representa gràficament les funcions de pertinença que defineixen la variable difusa d'OD. En aquest cas, definir funcions simètriques va comportar no aconseguir un solapament del 50% entre totes elles.


Figura 5.10. Representació gràfica de les funcions de pertinença de la variable d'entrada difusa OD.

El solapament entre les funcions 'MB' - 'B' i 'A' - 'MA' és del 50% mentre que les altres funcions presenten solapaments d'un 33 i un 40%. D'aquesta manera, que un valor discret tingui un determinat grau de pertinença a una funció, no significa que el grau restant pertanyi a la funció adjacent. Per exemple, si l'OD és de $0,6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, aquest valor pertany un 0,72 al conjunt 'Normal' però el 0,28 restant no pertany a cap altre conjunt; o si l'OD és de $0,4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, aquest valor pertany un 0,3 al conjunt 'Baix' i un 0,3 al conjunt 'Normal', sense que la suma dels dos graus de pertinença facin 1. Si el solapament es troba per sota del 50%, com el cas entre les funcions 'B' i 'Nor' o 'Nor' i 'A', la suma dels graus de pertinença d'un valor discret als conjunts 'B' i 'Nor' o 'Nor' i 'A' serà menor que 1 però superior a 0,5, valor a partir del qual es considera que la variable té una tendència massa propera a una conducta booleana (Heske i Heske, 1999).

Variable d'Entrada 2: ORP

L'univers de discurs de l'ORP va ser determinat en un interval de [-80 150]. La partició de l'univers de discurs va realitzar-se en cinc etiquetes lingüístiques, a l'igual que la variable anterior. En primer lloc es va determinar el valor pel qual l'ORP seria 'Baix' i que indicaria que la desnitrificació havia finalitzat. Aquest valor va ser de 10 mV, una mica per sota del valor del 'Nitrate Knee' (figura 5.8), d'aproximadament 20 mV. Per fixar el valor de

l'ORP considerat 'Normal' es va escollir el valor d'ORP amb el qual es produïa parcialment la desnitrificació i que es mantenia estable abans de donar-se el canvi de pendent del 'Nitrate Knee' (figura 5.8), és a dir, un valor d'uns 50 mV. Determinats els valors de màxim certesa per les etiquetes 'B' (10 mV) i 'Nor' (50 mV), es van determinar els valors de les restants etiquetes tenint en compte que la distància entre elles fos la mateixa, és a dir, una diferència de 40 mV entre elles. D'aquesta manera es van acabar de determinar els punts de màxima certesa per cadascuna de les etiquetes:

- 'MB': -30 mV
- 'B': 10 mV
- 'Nor': 50 mV
- 'A': 90 mV
- 'MA': 130 mV

A continuació es definiren els suports de les diferents funcions de pertinença tenint en compte l'obtenció de funcions simètriques triangulars i solapaments del 50%. Els suports de cadascuna de les etiquetes es troben en la taula 5.8 així com el tipus de funció de pertinença.

Taula 5.8. Definició de les funcions de pertinença de la variable difusa ORP .

ORP		Suport (mV)	Funció de pertinença
Molt Baix	MB	[-80 10)	Funció pseudotrapezoïdal
Baix	B	(-30 50)	Funció triangular
Normal	Nor	(10 90)	Funció triangular
Alt	A	(50 130)	Funció triangular
Molt Alt	MA	(90 150]	Funció pseudotrapezoïdal

La figura 5.11 mostra la representació gràfica de les funcions de pertinença que defineixen la variable difusa ORP. En aquest cas, l'obtenció de funcions simètriques amb solapament del 50% entre elles, comportà que cadascuna d'elles tingués la mateixa influència en el sistema de control.

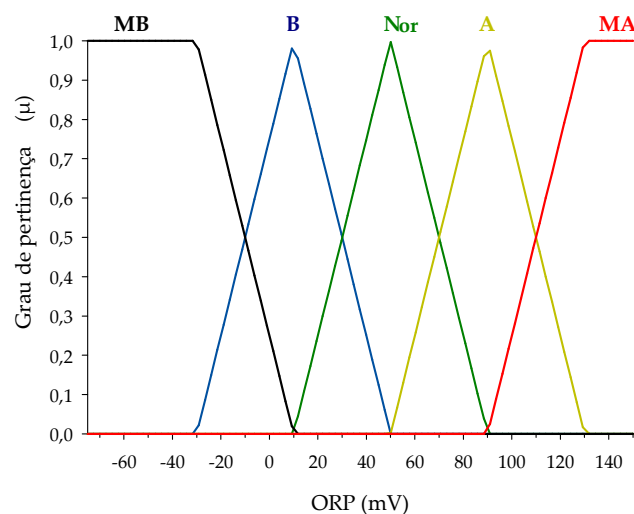


Figura 5.11. Representació gràfica de les funcions de pertinença de la variable d'entrada difusa ORP.

Degut a que no es pot treballar amb valors d'ORP amb el programa de simulació GPS-X (Fiter *et al.*, 2004), es va buscar una relació entre l'ORP i un altre paràmetre que es considerés en el model. En conseqüència, els valors d'ORP es van relacionar amb valors de nitrats (NO_3^-). L'univers de discurs definit per la variable NO_3^- va ser de $[0, 10]$.

Els punts de màxima certesa per cadascuna de les cinc etiquetes lingüístiques que havien de definir aquesta nova variable (les mateixes que presentava la variable ORP), van ser determinats de la següent manera:

- 'MB': -30 mV → 0 $\text{gN_NO}_3\cdot\text{m}^{-3}$
- 'B': 10 mV → 0 $\text{gN_NO}_3\cdot\text{m}^{-3}$
- 'Nor': 50 mV → 2.5 $\text{gN_NO}_3\cdot\text{m}^{-3}$
- 'A': 90 mV → 5 $\text{gN_NO}_3\cdot\text{m}^{-3}$
- 'MA': 130 mV → 7.5 $\text{gN_NO}_3\cdot\text{m}^{-3}$

Tant l'etiqueta 'MB' com 'B' corresponen a valors de 0 $\text{gN_NO}_3\cdot\text{m}^{-3}$ ja que es considera que a l'EDAR Taradell valors per sota de 10 mV indiquen la no presència de nitrats. A l'EDAR Taradell, un valor d'ORP de 50 mV indica que la desnitrificació no s'ha completat per la qual cosa es va assignar un valor de 2.5 $\text{gN_NO}_3\cdot\text{m}^{-3}$ a l'etiqueta 'Nor'.

Per continuar mantenint la mateixa distància entre les etiquetes que en el cas de l'ORP, es van acabar d'assignar la resta de valors de NO_3^- a les etiquetes 'A' i 'MA'. Partint de la base de mantenir la forma, simetria i solapament de les funcions de pertinença de la variable ORP, es van definir les funcions de pertinença i els seus suports per la variable NO_3^- tal i com es presenta a la taula 5.9.

Taula 5.9. Definició de les funcions de pertinença de la variable d'entrada NO_3^- per l'estudi de simulació .

NO_3^-		Suport ($\text{gN}\cdot\text{m}^{-3}$)	Funció de pertinença
Molt Baix / Baix	MB / B	[0 2.5)	Funció pseudotrapezoïdal
Normal	Nor	(0 5)	Funció triangular
Alt	A	(2.5 7.5)	Funció triangular
Molt Alt	MA	(7.5 50]	Funció pseudotrapezoïdal

La figura 5.12 mostra la representació gràfica de les funcions de pertinença de la variable difusa NO_3^- , necessària per poder dur a terme l'estudi de simulació.

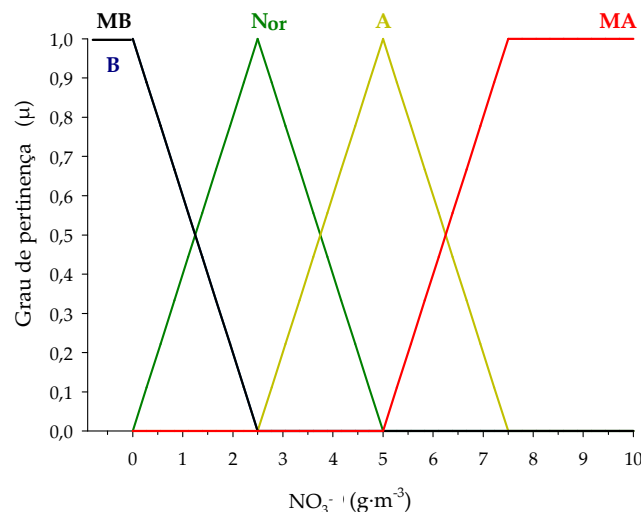


Figura 5.12. Representació gràfica de les funcions de pertinença de la variable d'entrada difusa NO per l'estudi de simulació.

Variable de Sortida: Aeració

L'aeració pot ser manipulada de diverses formes, segons valors de cabal d'aire, valors de revolucions per minut (rpm) del bufador, valors de freqüència del seu variador de freqüència, etc. Per una altra banda, es pot treballar amb valors discrets: augmentar o disminuir l'aeració indicant un valor concret de cabal, rpm, etc; o amb increments: augmentar l'aeració un tant per cent sense tenir en compte a quantes rpm està treballant el bufador o quin cabal d'aire s'està aportant.

En el cas del SCLD_N, es va determinar l'aeració a partir d'increments, que podien ser positius o negatius. Com que el procés és dinàmic en el temps i la càrrega variable, treballar amb valors d'increment en lloc de valors concrets fa que l'aeració pugui ajustar-se millor segons les condicions del procés al reactor.

L'única mesura disponible a l'EDAR Taradell van ser les rpm a les quals treballava el bufador. Per tant, la variació de l'aeració es va dur a terme sobre les rpm del bufador. La variació de l'aeració va determinar-se en funció d'un factor (FAer) que es multiplica a les rpm a les que treballa el bufador. Si es vol mantenir l'aeració el factor a multiplicar és de 1; si es vol disminuir l'aeració el factor és més petit que 1 i si es vol augmentar l'aeració, el factor és més gran que 1:

FAer = 1	→	mantenir l'aeració
FAer < 1	→	disminuir l'aeració
FAer > 1	→	augmentar l'aeració

Tractar amb variacions d'aeració implica treballar amb temps d'inferència suficientment petits per tal que l'aeració s'ajusti als requeriments del procés. Cal tenir en compte aquesta consideració a l'hora d'establir quin

increment d'aeració màxima pot produir-se en una única inferència. El temps d'inferència pel SCLD_N va ser d'un minut.

Com que la variació de l'aeració ha de ser gradual, el màxim augment de l'aeració va ser fixat en un 5% de l'aeració d'aquell moment, és a dir, un factor de 1,05 i la màxima reducció va ser també d'un 5% de l'aeració d'aquell moment, és a dir, un factor de 0,95. Per tant, l'univers de discurs de la variable 'Factor de l'Aeració' (FAer) fou [0,95 1,05].

Determinar un increment màxim superior al 5% hagués comportat un augment o disminució de l'aeració massa ràpid mentre que un increment màxim inferior al 5% s'hagués traduït en un increment massa lent de l'aeració.

La variable FAer també va ser definida per cinc etiquetes lingüístiques: 'Molt Negatiu' (MNeg), 'Negatiu' (Neg), 'Cap', 'Positiu' (Pos) i 'Molt Positiu' (MPos). Per tant el FAer a multiplicar a l'aeració en un moment determinat podia ser des de MNeg fins MPos. Les funcions de pertinença de cada etiqueta lingüística i els rangs dels seus suports es presenten en la taula 5.10.

Taula 5.10. Definició de les funcions de pertinença de la variable de sortida FAer.

FAer		Suport	Funció de pertinença
Molt Negatiu	MNeg	[0.95 0.975)	Funció pseudotrapezoïdal
Negatiu	Neg	(0.95 1)	Funció triangular
Cap	Cap	(0.975 1.025)	Funció triangular
Positiu	Pos	(1 1.05)	Funció triangular
Molt Positiu	MPos	(1.025 1.05]	Funció pseudotrapezoïdal

La partició de l'univers de discurs de la variable FAer en aquestes cinc etiquetes es troba representada en la figura 5.13.

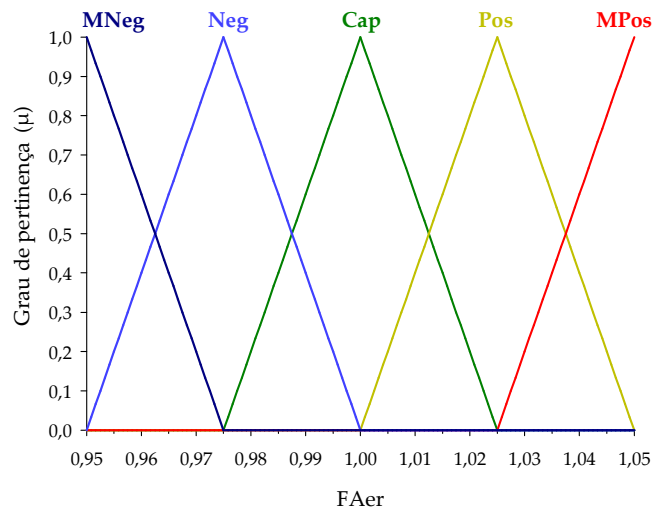


Figura 5.13. Representació gràfica de les funcions de pertinença de la variable de sortida difusa Factor d'Aeració.

V.5.2.2. Desenvolupament de les regles 'Si-Llavors'

Definides les variables difuses que formen part del SCLD_N, es va desenvolupar la matriu de decisió, el conjunt de regles 'Si-Llavors' que determinen la manera d'actuar del sistema de control. Les cinc etiquetes lingüístiques que defineixen les dues variables difuses d'entrada va donar lloc a que hi haguessin vint-i-cinc regles a definir en la matriu de decisió (5 X 5). L'estructura de les regles és del tipus:

SI OD és "MB" I ORP és "MB" LLAVORS FAer és "FAer_1"
on FAer_1 pot ser 'MNeg', 'Neg', 'C', 'Pos' o 'MPos'

A partir del coneixement teòric i de l'experiència del cap de planta es va desenvolupar la base de regles que es presenta a la taula 5.11. Com es pot observar, en aquesta matriu de decisió existeixen nou regles, ombrejades amb gris, que presenten dues opcions de FAer. L'elecció d'una o altra opció va donar lloc a dues matrius de decisió diferents (SCLD_N1 i SCLD_N2).

Taula 5.11. Matriu de decisió del SCLD_N per a determinar l'increment de l'aeració en funció de l'OD i l'ORP.

OD \ ORP	MB	B	Nor	A	MA
MB	R1: MPos	R2: MPos	R3: Pos	R4: Cap	R5: Neg / Cap
B	R6: MPos	R7: MPos	R8: Pos	R9: Cap	R10: Neg / Cap
Nor	R11: Pos / Cap	R12: Pos / Cap	R13: Cap	R14: Neg	R15: Neg
A	R16: Cap / Neg	R17: Cap / Neg	R18: Cap / Neg	R19: MNeg	R20: MNeg
MA	R21: Neg	R22: Cap/MNeg	R23: Cap/MNeg	R24: MNeg	R25: MNeg

Les regles 1, 2, 6 i 7, corresponents a les situacions d'OD i ORP 'Molt Baix' i 'Baix', determinen un augment màxim de l'aeració amb un FAer 'Molt Positiu', amb l'objectiu d'augmentar l'aeració per la nitrificació. En el vèrtex oposat, les regles 19, 20, 24 i 25 presenten una situació d'OD elevat i un ORP elevat que es tradueix amb una elevada concentració de nitrats. Per tant, l'acció determinada per aquestes regles és disminuir al màxim l'aeració amb un FAer 'Molt Negatiu' per facilitar la desnitrificació.

Degut a que la dinàmica de l'ORP és molt més lenta que la de l'OD (figura 5.8), es donaven dos grups de situacions que a priori es podrien considerar incoherents:

- Regles 4, 5, 9 i 10: l'OD sobrepassa valors considerats 'Normals' mentre que l'ORP encara es manté en valors massa baixos. Les regles 4 i 9 determinen no modificar l'aeració quan l'OD és 'Alt' i l'ORP és 'Molt Baix' o 'Baix', amb l'objectiu d'esperar que incrementi la presència de nitrats sense augmentar més l'aeració ja que l'OD es troba per sobre dels valors considerats 'Normals'. Les regles 5 i 10 poden actuar amb dues opcions diferents, mantenir el raonament de les regles 4 i 9 o bé determinar que l'aeració ha de disminuir encara que l'ORP sigui 'Molt Baix' o 'Baix' ja que l'OD és massa elevat.

- Regles 16, 17, 21 i 22: l'OD disminueix fins valors per sota dels considerats 'Normals' mentre que l'ORP encara es manté en valors elevats. Les regles 16 i 17 poden determinar dues accions, mantenir l'aeració perquè l'OD es troba per sota de valors 'Normals' o bé disminuir l'aeració amb FAer 'Negatiu' ja que valors d'ORP elevats indiquen presència de nitrats que cal eliminar. La regla 21 determina disminuir l'aeració encara que l'OD sigui 'Molt Baix' ja que valors d'ORP 'Molt Alts' indiquen elevada presència de nitrats. La regla 22 pot comportar dues accions, disminuir l'aeració amb un FAer 'Molt Negatiu' o 'Negatiu' quan l'ORP és 'Molt Alt' i l'OD és 'Baix'.

La regla 13 és la regla central de la matriu, on si l'OD i l'ORP són considerats 'Normals' cal mantenir l'aeració ja que és l'opció desitjada. Si l'OD és 'Normal' però l'ORP és 'Molt Baix' o 'Baix' es determina augmentar l'aeració amb un FAer 'Positiu' per facilitar la nitrificació (regles 3 i 8). Si al contrari, l'ORP és 'Alt' o 'Molt Alt' poden haver-hi dues accions diferents: la regla 18 determina que en el cas que l'ORP sigui 'Alt' i l'OD 'Normal', cal mantenir l'aeració o bé disminuir-la amb un FAer 'Negatiu' mentre que la regla 19 fixa un FAer 'Molt Negatiu' o 'Negatiu' quan l'ORP és 'Molt Alt', per tal de disminuir l'aeració i facilitar la desnitrificació.

Si l'ORP es considera 'Normal' però l'OD és 'Alt' o 'Molt Alt', les regles 14 i 15 determinen disminuir l'aeració amb un FAer 'Negatiu' perquè els valors de l'OD es troben per sobre dels considerats 'Normals'. Si en canvi, l'OD és 'Molt Baix' o 'Baix', les regles 11 i 12 poden indicar dues accions diferents: mantenir l'aeració indiferent als valors d'OD o augmentar una mica l'aeració amb un FAer 'Positiu' perquè l'OD arribi a valors considerats 'Normals'.

SCLD_N1

La primera opció de matriu de decisió del SCLD_N es presenta a la taula 5.12.

Taula 5.12. Base de regles del SCLD_N1

ORP \ OD	MB	B	Nor	A	MA
MB	MPos	MPos	Pos	Cap	Neg
B	MPos	MPos	Pos	Cap	Neg
Nor	Pos	Pos	Cap	Neg	Neg
A	Cap	Cap	Cap	MNeg	MNeg
MA	Neg	Neg	Neg	MNeg	MNeg

La figura 5.14 mostra la superfície de control resultant. Els colors de tonalitat blavosa representen FAer per sota de 1 i per tant són relacionats amb una disminució de l'aeració, el color verd representa la no modificació de l'aeració mentre que els colors de tonalitat ataronjada corresponen a l'augment d'aeració (FAer > 1).

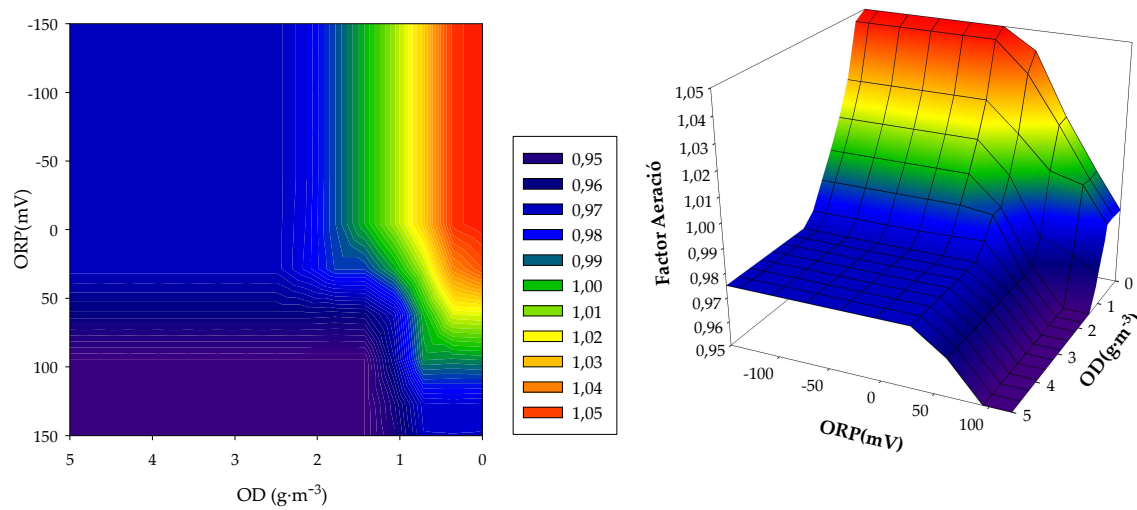


Figura 5.14. Exemple de superfície de control obtinguda amb la matriu de decisió del SCLD_N1.

SCLD_N2

La segona opció de matriu de decisió del SCLD_N es presenta a la taula 5.13.

Taula 5.13. Base de regles del SCLD_N2

ORP \ OD	MB	B	Nor	A	MA
MB	MPos	MPos	Pos	Cap	Cap
B	MPos	MPos	Pos	Cap	Cap
Nor	Cap	Cap	Cap	Neg	Neg
A	Neg	Neg	Neg	MNeg	MNeg
MA	Neg	MNeg	MNeg	MNeg	MNeg

La figura 5.15 mostra la superfície de control resultant. Els colors de tonalitat blavosa representen FAer per sota de 1 i per tant són relacionats amb una disminució de l'aeració, el color verd representa la no modificació de l'aeració mentre que els colors de tonalitat ataronjada corresponen a l'augment d'aeració (FAer > 1).

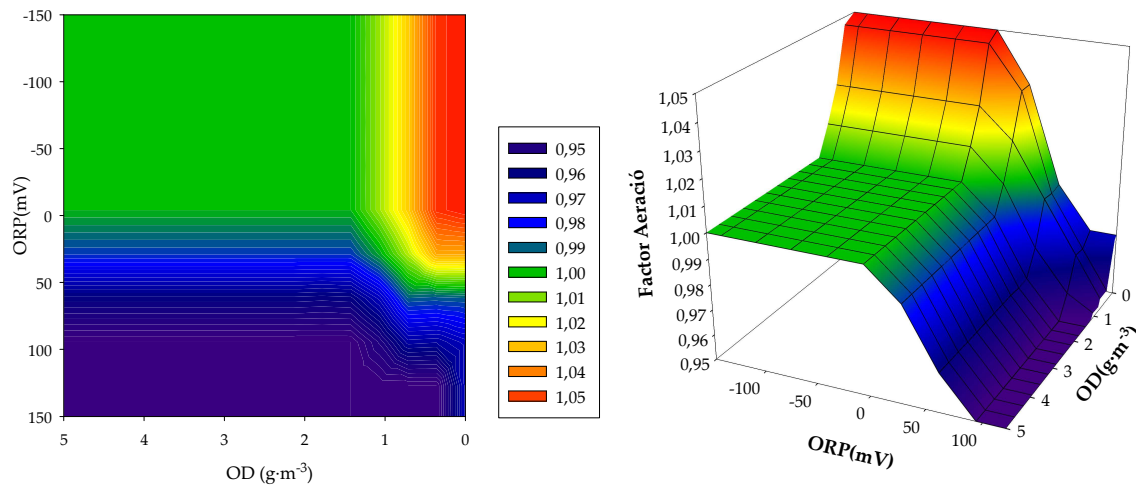


Figura 5.15. Exemple de superfície de control obtinguda amb la matriu de decisió del SCLD_N2.

V.5.3. Avaluació del SCLD_N

Per avaluar el comportament de les dues opcions de SCLD_N es van comparar, en un estudi de simulació dinàmica amb el model de l'EDAR Taradell, les estratègies d'aeració determinades per aquests sistemes de control amb altres estratègies basades en l'aeració intermitent i en l'aeració segons un valor de referència d'OD. Aquesta avaluació es va realitzar mitjançant el càlcul dels índexs prèviament definits (apartat V.4) en totes les simulacions amb les diferents estratègies d'aeració. A continuació s'explica en detall la modelització de l'EDAR Taradell, amb la construcció del diagrama de procés, caracterització de l'aigua d'entrada i determinació de les condicions d'operació; el procediment seguit per dur a terme les simulacions i per acabar, els resultats obtinguts.

V.5.3.1. Modelització de l'EDAR Taradell

La modelització de l'EDAR Taradell es va realitzar en tres passos. Primer de tot, es va construir el model, es dissenyà l'esquema de l'EDAR determinant les unitats que descriuen la instal·lació (decantadors, reactors,...), els seus paràmetres físics i les relacions entre elles. A continuació es va caracteritzar l'aigua d'entrada, és a dir, es va definir el cabal i la composició de l'afluent basats, en aquest estudi, en els tres escenaris predefinitos del protocol Benchmark (Copp, 2002). Tot seguit es van determinar les condicions d'operació (cabals de recirculació i purga, tipus d'aeració i similars). Finalment, van introduir-se com a paràmetres cinètics i estequiòmics del procés modelat, els valors per defecte del model ASM1.

Disseny i construcció del model

La figura 5.16 presenta el diagrama de procés de l'EDAR Taradell que es va introduir al programa GPS-X. Aquest diagrama inclou els reactors biològics i els decantadors secundaris. No es va modelitzar el pretractament ni la

línia de fang, ja que no era objecte d'aquest estudi. La línia d'aigua es divideix en dues línies paral·leles, cadascuna amb un reactor anòxic de 220 m³ i dos flux pistó amb un volum total de 1092 m³ (el volum que a la instal·lació real correspon al carrousel d'oxidació). Després dels reactors biològics la línia d'aigua va cap als respectius decantadors secundaris, on finalment, l'aigua de sortida de cadascuna de les unitats s'uneix per ser abocada a medi receptor. Cada decantador secundari té una superfície de 114 m² i una profunditat de 2.8 m. L'alçada de la campana és de 1.2 m. La purga es duu a terme des dels decantadors secundaris i la recirculació externa de fangs de cadascun d'ells s'uneix en un sol cabal que es barreja amb el cabal d'entrada abans de dividir-se de nou cap als dos reactors biològics.

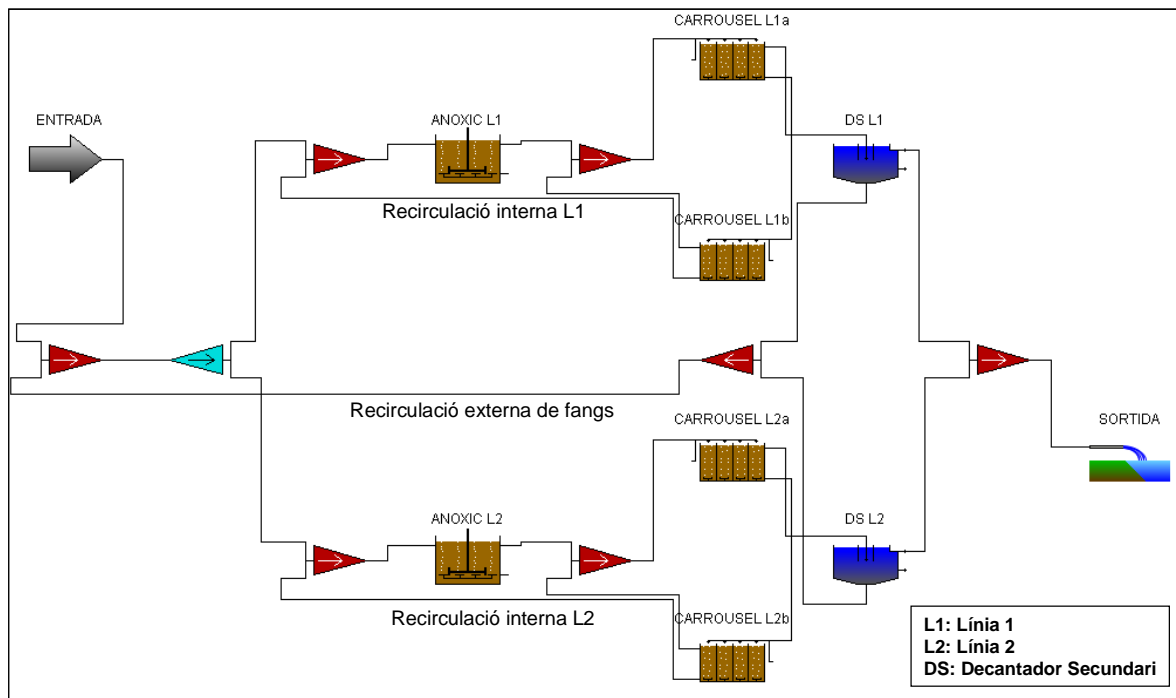


Figura 5.16. Esquema de l'EDAR Taradell en el programa GPS-X.

Encara que el programa GPS-X inclou una unitat predefinida amb la configuració d'un carrousel d'oxidació, en el cas concret del model de l'EDAR Taradell no es va utilitzar degut a no poder determinar lliurement des de quina zona es recirculava els nitrats (recirculació interna), en quina zona arribava el cabal d'entrada i des de quina zona s'enviava l'efluent del reactor cap al decantador. En el seu lloc es van definir dues unitats de flux pistó per configurar el carrousel real de cada línia. El primer flux pistó amb cinc compartiments (carrousel L1a / carrousel L2a) i el segon amb tres compartiments (carrousel L1b / carrousel L2b), equivalents a vuit RCTA en línia. La metodologia emprada per modelitzar el carrousel d'oxidació es basa en la tesi publicada per Abusam (2001) on descriu un protocol benchmark per aquest tipus de configuracions.

Les figures 5.17 i 5.18 representen esquemàticament com es va dur a terme la partició del carrousel de la línia 1 en els diferents compartiments de les unitats flux pistó. El mateix procediment es va seguir per configurar el carrousel de la línia 2. La figura 5.17 presenta una ampliació de l'esquema de la figura 5.16, on es mostren els reactors biològics de la línia 1. L'entrada C1 és l'entrada al carrousel de la línia, la sortida C1 és la sortida del

carrousel de la línia 1 i la unió 5-6 és el cabal determinat que passa del primer flux pistó (carrousel L1a) al segon (carrousel L1b). Aquest cabal (Q_{5-6}) es va calcular a partir de l'àrea de pas del carrousel en aquella zona per la velocitat del flux (determinada per la velocitat que proporciona el vehicular), mitjançant l'equació 5.8.

$$Q_{5-6} = \text{Àrea de pas} \times \text{velocitat flux} = 17.06 \text{ m}^2 \times 0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} = 6.824 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1} = 589593.6 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1} \quad (5.8)$$

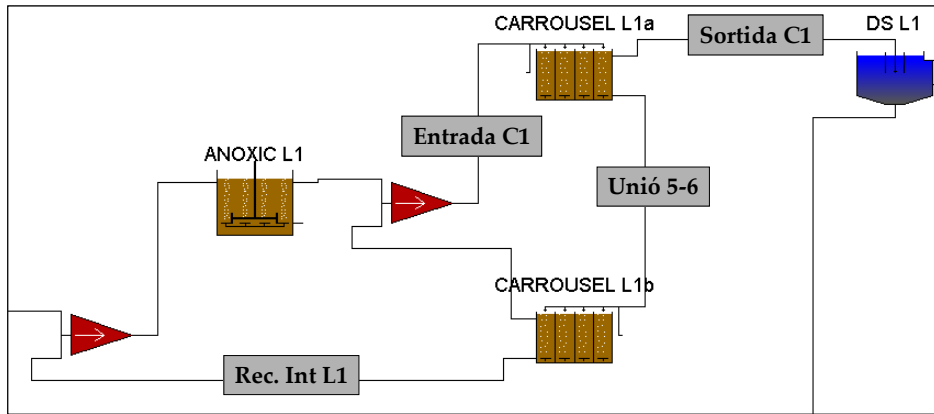


Figura 5.17. Esquema de la configuració dels reactors biològics de la línia 1 de l'EDAR Taradell en el programa GPS-X.

En la figura 5.18 es mostra en forma d'esquema, els volums introduïts en cada compartiment dels fluxos pistons i quina distribució s'ha seguit per modelitzar el carrousel.

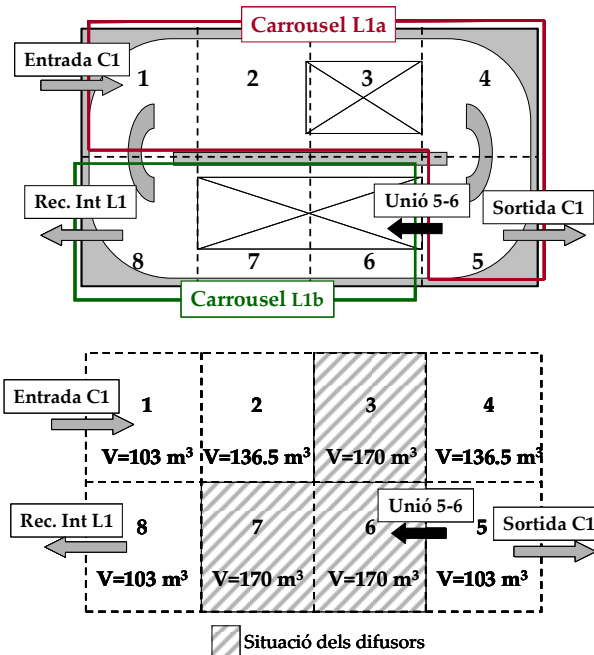


Figura 5.18. Esquema de la partició del carrousel de la línia 1 de l'EDAR Taradell en vuit reactors en línia per poder ser modelitzat en el GPS-X.

El model de fangs activats utilitzat per modelar els processos biològics dels reactors va ser el model 'mantís' desenvolupat per *Hydromantis Inc.* Aquest model es basa en l'ASM1 (Henze *et al.*, 1987) amb les següents modificacions:

- S'introdueixen dos processos de creixement addicional, un pels microorganismes autotròfics i un altre pels heterotròfics: aquests processos són introduïts per tenir en compte el creixement dels organismes en condicions de poc amoni i molt de nitrat. Sota aquestes condicions, els organismes poden consumir nitrat com una font de nutrients.
- Els paràmetres cinètics son dependents de la temperatura: aquesta dependència és descrita per l'equació d'Arrhenius.
- Es contempla el procés de desnitrificació aeròbica: aquest procés s'inclou en el model segons la modificació de Münch (Münch *et al.*, 1996). En molts casos, s'ha comprovat que s'han sobreestimat nivells de nitrats en els models degut a simplificacions (tancs airejats ideals completament barrejats, no limitació de la difusió d'oxigen en el nucli dels floculs,...i altres). Aquesta modificació consisteix en un nou coeficient de saturació d'oxigen que fa ajustable la velocitat de creixement anòxic independentment del creixement aeròbic, i el coeficient per si mateix és una indicació del grau de desnitrificació aeròbica que succeeix amb la planta modelada. El valor per defecte de la nova constant és igual a la constant de saturació d'oxigen aeròbica.

Els decantadors van ser modelats amb el model anomenat 'simple 1d' basat en la teoria de flux de sòlids (Patry *et al.*, 1992; Parakevas *et al.*, 1993; Ottherphol *et al.*,1992; Koehne *et al.*, 1995) on la velocitat de sedimentació és representada amb una doble funció exponencial (Takács *et al.*, 1991).

Caracterització de l'aigua d'entrada

Per dur a terme l'estudi de simulació dinàmica (condicions variables en el temps) és necessari definir un afluent amb variabilitat de cabal i composició. Com que l'EDAR Taradell no compta amb un registre diari dels paràmetres que caracteritzen l'aigua d'entrada, es va utilitzar la variabilitat de composició i cabal determinat pel protocol Benchmark, adequat a l'escala de l'EDAR Taradell. Es van extrapolar els tres escenaris predefinits pel Benchmark a partir de les dades mitjanes de cabal, DQO i NKT que caracteritzen l'afluent de l'EDAR Taradell, valors presentats anteriorment a la taula 5.2. Amb la utilització d'aquests escenaris, l'estudi de simulació es va dur a terme sota condicions normals (escenari temps sec) i de pertorbació (escenari tempesta i pluja). La taula 5.14 presenta els valors estadístics (mitjana, màxim, mínim i desviació estàndard) dels paràmetres que defineixen l'afluent en els tres escenaris.

Taula 5.14. Cabal i composició de l'afluent dels tres escenaris predefinits per l'estudi de simulació dinàmica amb el model de l'EDAR Taradell.

	Temps SEC				PLUJA				TEMPESTA			
	Mitj.	Màx.	Mín.	σ	Mitj.	Màx.	Mín.	σ	Mitj.	Màx.	Mín.	σ
Qen ($m^3 \cdot d^{-1}$)	2036	3552	1103	566,8	2194	5753	1103	823,7	2108	6622	1103	742,8
DQO ($gO_2 \cdot m^{-3}$)	550,6	835	314	137,9	529,8	835	115	151,1	545,9	1444	106	147,45
NKT ($gN \cdot m^{-3}$)	57,6	92	36	13,1	55,5	92	13	14,8	56,9	92	11	13,9

Les figures 5.19, 5.20 i 5.21 mostren l'evolució de cabal i composició en DQO i TKN de l'aigua d'entrada dels tres escenaris utilitzats per l'estudi de simulació.

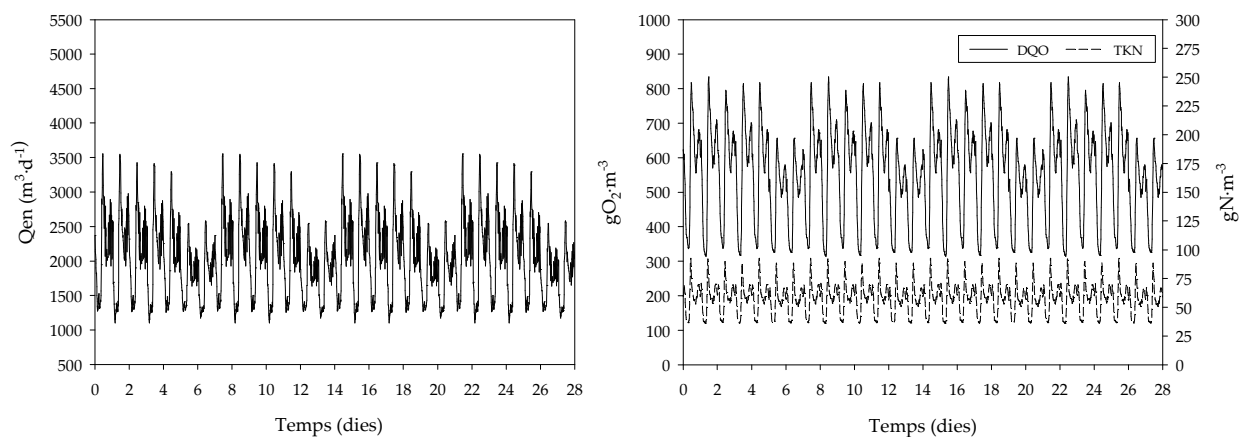


Figura 5.19. Composició i cabal de l'entrada de l'escenari temps sec adaptat a l'escala de l'EDAR Taradell.

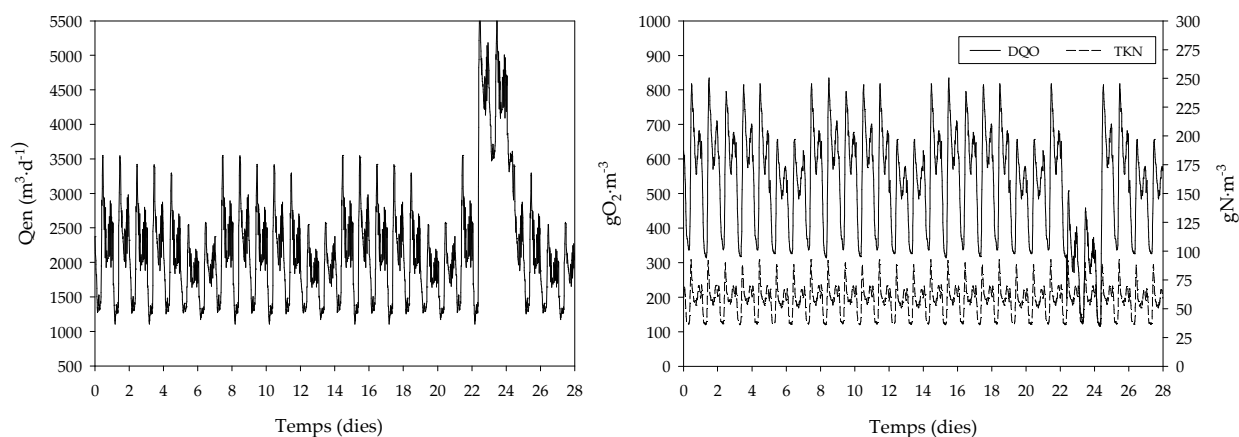


Figura 5.20. Composició i cabal de l'entrada de l'escenari pluja adaptat a l'escala de l'EDAR Taradell.

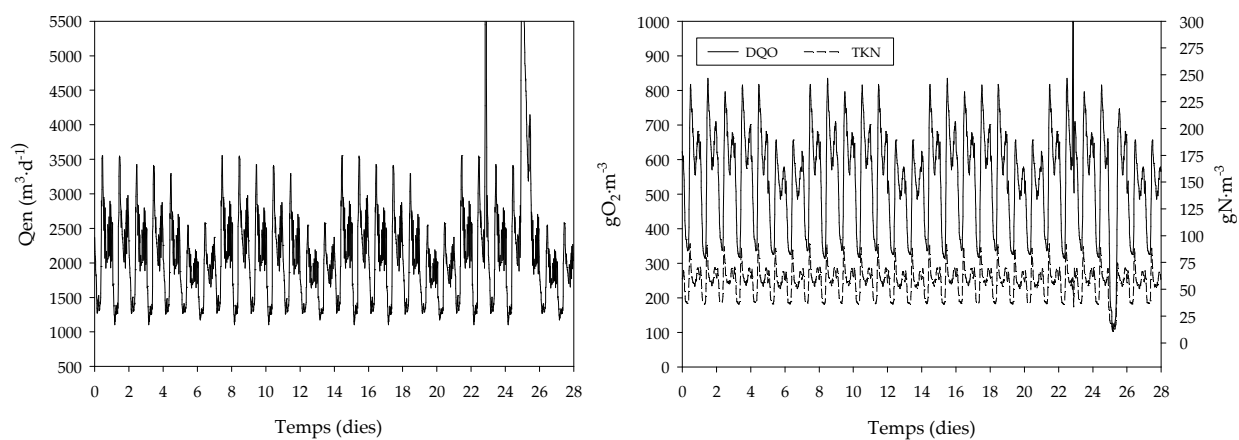


Figura 5.21. Composició i cabal de l'entrada de l'escenari tempesta adaptat a l'escala de l'EDAR Taradell.

Determinació condicions d'operació

La taula 5.15 presenta les condicions d'operació que s'introduïren en el model de l'EDAR Taradell i que corresponen als valors amb els quals es treballava en la instal·lació real.

Taula 5.15. Condicions d'operació introduïdes en el model de l'EDAR Taradell en el GPS-X.

Paràmetres	Cabal (m ³ ·d ⁻¹)	Observacions	
Purga	960	Els primers 5' de cada hora	Cabal unitari
Recirculació	960	De les 00:00 a les 8:00h	Cabal unitari
	1920	De les 8:00 a les 24:00h	
Recirculació Interna	2880	Constant	Cabal per cada línia

L'aeració de l'EDAR Taradell és proporcionada per difusors. Aquest tipus d'aeració pot ser simulada amb el programa GPS-X introduint el cabal d'aire proporcionat. No obstant, aquest paràmetre no va poder ser determinat ni estimat des de la potència del bufador. En aquests casos, el GPS-X permet introduir el correcte nivell d'OD canviant directament l'eficiència de transferència de l'oxigen (K_{La}). Per tant, les estratègies d'aeració simulades van treballar directament amb la K_{La} .

V.5.3.2. Procediment de l'estudi de simulació amb el model de l'EDAR Taradell

El primer pas és simular el sistema amb condicions d'estat estacionari (EE) utilitzant un afluent constant en composició i cabal. Totes les simulacions dinàmiques han de partir de simulacions en EE. Això assegura un punt de partida consistent a l'hora de generar un efluent dinàmic. En aquest cas, les dades d'entrada utilitzades per trobar l'EE són les dades de cabal i composició mitjanes de l'escenari temps sec (taula 5.14).

Amb la intenció de seguir la mateixa metodologia d'avaluació que el protocol Benchmark, es van simular les quatre setmanes de cadascun dels tres escenaris partint de les mateixes condicions inicials (del mateix EE) amb les diferents estratègies d'aeració a comparar. Els índexs d'avaluació van ser calculats sobre els últims set dies de cada escenari, tal i com s'explica en el protocol Benchmark (apartat III.3 del capítol de Materials i Mètodes).

Els dos SCLD_N van ser avaluats i comparats amb altres estratègies d'aeració, resumides en la taula 5.16.

Taula 5.16 Estratègies d'aeració simulades.

Núm.	ESTRATÈGIES D'AERACIÓ		
0	ESTRATÈGIA de Referència	No control	Llaç Obert
1	OPCIÓ 1: Aeració alternada	Aeració temporitzada	T_1 (86% + 14%)
2			T_2 (75% + 25%)
3			T_3 (67% + 33%)
4			T_4 (60% + 40%)
5		Control ON-OFF	CONSIGNES
6	OPCIÓ 2: N/D simultània	Control PI de l'OD	PC 1
7			PC 0.5
8			PC 0.25
9			SCLD_N1
10		SCLD	SCLD_N2

ESTRATÈGIA de Referència (Núm. 0). Simulació de l'aeració amb llaç obert. La primera simulació es duta a terme en condicions d'aeració màxima ($K_{La} = 200 \text{ d}^{-1}$) durant les 24 hores, és a dir, mitjançant un llaç obert d'aeració constant. Amb aquesta estratègia es simula la configuració per la qual va ser dissenyada l'EDAR Taradell, amb una cambra anòxica inicial i un carrousel aeròbic.

Tenint com a referent que a l'EDAR Taradell, si el carrousel està airejat tot el dia, es produeix una nitrificació completa però una desnitrificació parcial, amb aquesta estratègia d'aeració simulada s'espera que succeeixi el mateix i que per tant, s'hagin de buscar altres estratègies d'aeració pel carrousel amb l'objectiu final d'aconseguir un procés de desnitrificació completa. Per proporcionar una solució a aquesta situació es plantegen dues opcions: augmentar el període d'anòxia i/o aconseguir la nitrificació/desnitrificació simultània (NDS) en el carrousel. No es va considerar l'opció de variar la recirculació interna, ja que a l'EDAR real no es podia modificar.

ESTRATÈGIES OPCIO 1. Augment del període d'anòxia. La manera d'aconseguir augmentar el període d'anòxia en l'EDAR Taradell és alternant l'aeració en el carrousel. Aquesta aeració intermitent es pot dur a terme de diverses maneres. Les simulacions realitzades amb aquesta estratègia s'engloben en dos grups:

- **Aeració temporitzada.** S'alternen engegades i aturades de l'aeració al carrousel en períodes prefixats. L'aeració quan es troba en marxa és sempre constant (amb la mateixa K_{La} que amb la simulació de llaç obert).

Es van simular quatre estratègies d'aeració temporitzades diferents:

Núm. 1. T_1: 86% aerobi + 14% anòxic en períodes de 70 minuts

Núm. 2. T_2: 75% aerobi + 25% anòxic en períodes de 80 minuts

Núm. 3. T_3: 66.6% aerobi + 33.3% anòxic en períodes de 90 minuts

Núm. 4. T_4: 60% aerobi + 40% anòxic en períodes de 100 minuts

- **Control ON / OFF (Núm. 5).** Control de l'aeració alternada segons valors d'ORP i OD. D'aquesta manera també es pot aconseguir augmentar el període d'anòxia, engegant i parant l'aeració en funció d'uns valors de consigna d'ORP i OD. Quan l'aeració es troba en marxa, el valor de K_{La} és de 200 d^{-1} (el mateix valor que les estratègies anteriors). Aquesta estratègia va ser utilitzada en l'EDAR Taradell abans de la implementació del SCLD_N i es troba explicada en l'apartat V.3.4. Aquesta estratègia va ser anomenada 'CONSIGNES'.

ESTRATÈGIES OPCIO 2. Control de l'aeració per nitrificar i desnitrificar simultàniament. Per aconseguir la NDS cal ajustar l'aeració de manera que porti el mínim d'OD que permeti nitrificar però que alhora no pertorbi la desnitrificació (en l'apartat I.1.2.1 s'explica la base teòrica de la NDS). Es varen simular dos tipus de control d'aeració per assolir aquest objectiu. El primer, un control de retroalimentació de l'OD del tipus PI i el segon, els SCLD_N desenvolupats en l'apartat V.5.2.

- **Control PI de l'OD.** El primer pas va ser buscar quin punt de consigna (PC) d'OD havia d'ajustar aquest llaç de control per aconseguir la NDS. Per això, es van dur a terme tres simulacions diferents amb tres PC de l'OD:

Núm. 6. PC 1: punt de consigna de l'OD de $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$

Núm. 7. PC 0.5: punt de consigna de l'OD de $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$

Núm. 8. PC 0.25: punt de consigna de l'OD de $0.25 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$

La sintonització del controlador PI es va dur a terme manualment, ajustant les constants de guany proporcional (K_p) i de temps integral (T_i) mitjançant el càlcul dels índexs 'Integral de l'error absolut' (IAE) i 'Integral de l'error al quadrat' (ISE) (equacions 3.13 i 3.14). Amb una K_p de 160 i un T_i de 0.002 d^{-1} es va ajustar el controlador, amb valors de IAE i ISE inferiors al 0.055 i al 0.0029 respectivament, tal i com es mostra en la taula 5.17.

Taula 5.17. Valor dels índexs IAE i ISE del controlador PI en l'estudi de simulació

Valor SP	Escenari temps sec		Escenari Pluja		Escenari Tempesta	
	IAE	ISE	IAE	ISE	IAE	ISE
0.25	$0.68 \cdot 10^{-2}$	$0.027 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$0.9 \cdot 10^{-3}$	$0.72 \cdot 10^{-2}$	$0.028 \cdot 10^{-3}$
0.5	$2.4 \cdot 10^{-2}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$	$0.2 \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-2}$	$2.9 \cdot 10^{-3}$
1	$3.9 \cdot 10^{-2}$	$0.43 \cdot 10^{-3}$	$3.8 \cdot 10^{-2}$	$0.4 \cdot 10^{-3}$	$5.5 \cdot 10^{-2}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$

- **SCLD_N.** L'estratègia d'aeració que marca aquest sistema de control s'ha explicat detalladament en l'apartat V.5.2.2. Es van realitzar simulacions de les dues versions de SCLD_N que es van desenvolupar:

Núm. 9. SCLD_N1

Núm. 10. SCLD_N2

Definides les estratègies d'aeració a avaluar i comparar, a continuació s'explica en detall els resultats obtinguts de les diverses simulacions.

V.5.3.3. Resultats de l'avaluació del SCLD_N

De la taula 5.18 a la 5.23 es presenten els resultats de l'estudi de simulació per avaluar i comparar els SCLD_N amb altres estratègies d'aeració (resumides en la taula 5.16) sota condicions normals de l'afluent (escenari temps sec) i de pertorbació (escenari de pluja i tempesta).

En cada subapartat de resultats es presenten dues taules segons l'escenari simulat (de temps sec, pluja o tempesta). En la primera taula es mostra el resultat dels índexs d'avaluació prèviament definits en l'apartat V.4, i en la segona es presenten les concentracions mitjanes del nitrogen a l'efluent en forma de Nitrogen total (Ntotal), NKT i Nitrats (NO_3^-), que es van obtenir de la simulació de les diferents estratègies d'aeració.

Resultats de les simulacions amb l'escenari temps sec.

La taula 5.18 i 5.19 presenten els resultats de les simulacions en l'escenari temps sec. El SCLD_N2 és la millor opció segons els índexs de QE, Q_{EN} i TV_N . Respecte l'energia consumida per l'aeració, amb les estratègies T_3, T_4 i PC 0.25, s'obtenen valors de l'índex de CEA menors que amb SCLD_N2. No obstant, aquestes estratègies (sobretot T_3 i T_4) minimitzen el consum energètic en detriment d'una bona qualitat a l'efluent, presentant valor de QE i Q_{EN} superiors a SCLD_N2. Per tant, és el SCLD_N2 que aconsegueix minimitzar més el consum energètic a la vegada que presenta els millors rendiments d'eliminació de nitrogen: redueix un 27% l'energia consumida per l'aeració amb l'estratègia de llaç obert, a la vegada que disminueix gairebé un 50% la càrrega contaminant a l'efluent.

Taula 5.18. Índexs d'avaluació i resultats de les simulacions amb l'escenari temps sec (condicions normals)

ESTRATÈGIES D'AERACIÓ				ESCENARI TEMPS SEC (Càlcul índexs)			
Ref.	0	No control	Llaç Obert	QE (kg cont·d ⁻¹)	Q_{EN} (kg N·d ⁻¹)	TV_N (%)	CEA (kW·h·d ⁻¹)
OPCIÓ 1	1		T_1 (86% + 14%)	514.54	18.4	0	1077.87
	2	Aeració temporitzada	T_2 (75% + 25%)	470.23	16.1	0	942.75
	3		T_3 (67% + 33%)	1112.64	48.03	100	838.13
	4		T_4 (60% + 40%)	1746.80	79.38	100	754.72
	5	Control ON-OFF	CONSIGNES	671.14	26.25	4.61	1227.31
OPCIÓ 2	6	Control PI de l'OD	PC 1	612.27	23.3	0	1077
	7		PC 0.5	484.67	16.89	0	971.75
	8		PC 0.25	504.30	17.81	0	895.46
	9	SCLD	SCLD_N1	463.03	15.81	0	966.52
	10		SCLD_N2	421.88	13.74	0	919.22

La primera simulació realitzada amb el llaç obert d'aeració va confirmar el que succeïa en la realitat, l'incompliment dels límits legals d'abocament del nitrogen degut a una desnitrificació parcial. Les concentracions mitjanes de nitrogen de la taula 5.19 mostren com gairebé tot el nitrogen total de l'efluent ($15.65 \text{ gN}\cdot\text{m}^{-3}$) es troba en forma de nitrats ($13.79 \text{ gN}\cdot\text{m}^{-3}$).

Taula 5.19. Concentracions mitjanes del nitrogen de l'efluent resultants de les simulacions amb l'escenari de temps sec (condicions normals)

ESTRATÈGIES D'AERACIÓ				ESCENARI TEMPS SEC (Concentracions mitjanes N efluent)		
Ref.	0	No control	Llaç Obert	Ntotal (gN·m ⁻³)	NKT (gN·m ⁻³)	NO _x ⁻ (gN·m ⁻³)
				15.65	1.86	13.79
OPCIÓ 1	1		T_1 (86% + 14%)	9.33	2.69	6.65
	2	Aeració temporitzada	T_2 (75% + 25%)	8.23	6.28	1.95
	3		T_3 (67% + 33%)	24.68	24.36	0.32
	4		T_4 (60% + 40%)	40.59	40.54	0.05
	5		Control ON-OFF	CONSIGNES	11.97	9.82
OPCIÓ 2	6	Control PI de l'OD	PC 1	11.86	2.08	9.78
	7		PC 0.5	8.6	2.83	5.77
	8		PC 0.25	9.10	7.71	1.38
	9	SCLD	SCLD_N 1	7.93	2.97	4.96
	10		SCLD_N 2	6.29	3.74	2.55

En les estratègies de l'opció 1, s'observa com en disminuir el percentatge de temps airejat, del 86% en T_1 al 60% en T_4, hi ha una disminució de la capacitat de nitrificant, amb valors de NKT de 2.69 g·m⁻³ amb l'estratègia T_1 i valors de 40.59 g·m⁻³ amb l'estratègia T_4. A partir de valors de temps d'aeració més petits del 75% (estratègia T_2) hi ha una pèrdua progressiva de la nitrificació. Les estratègies T_3 i T_4 presenten pitjors resultats que airejar en continu degut a que existeix un temps d'anòxia massa elevat que no permet nitrificar. No s'aporta l'OD necessari per l'eliminació biològica de la matèria orgànica i per la nitrificació. Amb l'estratègia T_4, on el temps d'anòxia és del 40%, es perd totalment la nitrificació, el valor de concentració mitjana a l'efluent de NKT (40.54 g·m⁻³) és gairebé el mateix que el del Ntotal (40.59 g·m⁻³)

L'estratègia CONSIGNES, resulta pitjor que l'aeració temporitzada T_2. Si s'aireja segons aquesta estratègia de consignes, es supera el límit legal d'abocament de nitrogen en un 5% del temps de simulació.

Pel que respecta a les estratègies amb un control PI de l'OD, és quan es fixa el punt de consigna a 0.5 g·m⁻³ que s'obtenen els millors resultats de qualitat de l'efluent. Si es disminueix més el punt de consigna, (estratègia de PC 0.25) encara que s'optimitza més el consum energètic de l'aeració la qualitat de l'efluent empitjora, tant a nivell global com en nitrogen.

Finalment, amb les dues opcions de SCLD_N s'obtenen millors resultats de Ntotal a l'efluent que la millor estratègia del grup de controladors PI (amb un PC de 0.5), sobretot amb SCLD_N2.

Resultats de simulacions amb l'escenari pluja.

Les taules 5.20 i 5.21 presenten els resultats de les simulacions en l'escenari pluja. Amb aquest escenari, tots els índexs empitjoren però amb la mateixa proporció entre les diferents estratègies que en les simulacions amb condicions normals (escenari temps sec).

La resposta de les diferents opcions d'aeració continua essent similar en funció de cada estratègia, i els sistemes de control basats en lògica difusa mantenen els millors resultats, tant en qualitat d'efluent com en la minimització del consum energètic lligada a un rendiment d'eliminació correcte del nitrogen. Les estratègies T_3 i T_4 continuen essent molt pitjors que la resta, superant el límit legal d'abocament de nitrogen el 90% del temps que es simula quan s'aireja segons T_3 i en tot moment quan s'aireja segons T_4.

Taula 5.20. Índexs d'avaluació i resultats de les simulacions amb l'escenari de pluja (condicions de pertorbació)

ESTRATÈGIES D'AERACIÓ				ESCENARI TEMPS PLUJA (Càlcul índexs)			
				QE (kg cont·d ⁻¹)	QE _N (kg N·d ⁻¹)	TV _N (%)	CEA (kW·h·d ⁻¹)
Ref.	0	No control	Llaç Obert	812.21	31.47	8	1256.58
OPCIÓ 1	1	Aeració temporitzada	T_1 (86% + 14%)	645.75	23.11	0	1077.87
	2		T_2 (75% + 25%)	559.42	18.71	0	942.75
	3		T_3 (67% + 33%)	1139.52	47.50	89.49	838.13
	4		T_4 (60% + 40%)	1810.84	80.63	100	754.72
	5	Control ON-OFF	CONSIGNES	761.67	28.94	0	1145.74
OPCIÓ 2	6	Control PI de l'OD	PC 1	745.15	28.1	0	1067.74
	7		PC 0.5	606.93	21.16	0	957.95
	8		PC 0.25	640.40	22.73	0	869.60
	9	SCLD	SCLD_N1	601.97	20.92	0	962.61
	10		SCLD_N2	544.69	18.03	0	906.38

Segons els valors presentats a la taula 5.21, les dues versions del SCLD_N mantenen valors similars de concentració de nitrogen a l'efluent que en l'escenari de temps sec (condicions normals), la qual cosa indica que les condicions de pertorbació produïdes per la pluja, que es simulen en aquest escenari, no afecten a l'eliminació del nitrogen quan s'aireja segons SCLD_N1 o SCLD_N2.

Taula 5.21. Concentracions mitjanes del nitrogen de l'efluent resultants de les simulacions amb l'escenari pluja (condicions de pertorbació)

ESTRATÈGIES D'AERACIÓ				ESCENARI TEMPS PLUJA (Concentracions mitjanes N efluent)		
				Ntotal (gN·m ⁻³)	NKT (gN·m ⁻³)	NO _x (gN·m ⁻³)
Ref.	0	No control	Llaç Obert	12.56	2.15	10.41
OPCIÓ 1	1	Aeració temporitzada	T_1 (86% + 14%)	9.19	2.75	6.44
	2		T_2 (75% + 25%)	7.29	4.99	2.29
	3		T_3 (67% + 33%)	18.96	18.53	0.43
	4		T_4 (60% + 40%)	32.53	32.47	0.06
	5	Control ON-OFF	CONSIGNES	11.38	2.24	9.14
OPCIÓ 2	6	Control PI de l'OD	PC 1	11.07	2.22	8.85
	7		PC 0.5	8.28	2.98	5.29
	8		PC 0.25	8.91	7.71	1.20
	9	SCLD	SCLD_N 1	7.96	2.97	4.99
	10		SCLD_N 2	6.33	3.77	2.56

Es segueix produint una desnitrificació significativament incompleta quan s'aireja segons llaç obert, CONSIGNES i Control de l'OD amb un PC de $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, mentre que les estratègies T_3 i T_4 continuen sense aconseguir la nitrificació.

En resum, els resultats obtinguts amb les simulacions sota condicions de pertorbació de pluja no altera significativament la classificació de millors i pitjors estratègies d'aeració obtinguda en les simulacions de l'escenari temps sec. Els SCLD_N continuen essent les millors estratègies, juntament amb T_2 i el control PI amb un PC de $0.5 \text{ gO}_2\cdot\text{m}^{-3}$, mentre que T_3 i T_4 continuen essent les que presenten pitjors resultats.

Resultats de les simulacions amb l'escenari tempesta.

Les taules 5.22 i 5.23 presenten els resultats de les simulacions en l'escenari tempesta. Amb aquestes condicions de pertorbació, igual que en l'escenari pluja, tots els índexs empitjoren, però mantenint-se els SCLD_N com les millors estratègies i T_3 i T_4 com les pitjors.

Taula 5.22. Índexs d'avaluació i resultats de les simulacions amb l'escenari tempesta (condicions de pertorbació)

ESTRATÈGIES D'AERACIÓ				ESCENARI TEMPS TEMPESTA (Càlcul índexs)			
				QE (kg cont·d ⁻¹)	QEN (kg N·d ⁻¹)	TVN (%)	CEA (kW·h·d ⁻¹)
Ref.	0	No control	Llaç Obert	724.98	27.9	4	1256.58
OPCIÓ 1	1	Aeració temporitzada	T_1 (86% + 14%)	559.14	19.57	0	1077.87
	2		T_2 (75% + 25%)	593.33	21.16	0	942.75
	3		T_3 (67% + 33%)	1234.83	52.99	100	838.13
	4		T_4 (60% + 40%)	1836.37	82.65	100	754.72
	5	Control ON-OFF	CONSIGNES	678.55	25.58	0	1156.95
OPCIÓ 2	6	Control PI de l'OD	PC 1	676.78	25.48	0	1096.39
	7		PC 0.5	539.9	18.61	0	984.62
	8		PC 0.25	589.81	21.02	0	901.71
	9	SCLD	SCLD_N1	530.96	18.15	0	988.01
	10		SCLD_N2	481.96	15.69	0	936.33

Segons els valors de concentracions mitjanes del nitrogen a l'efluent que es presenten a la taula 5.23, es mantenen les respostes del procés d'eliminació biològica del nitrogen segons les estratègies d'aeració que s'han obtingut en les altres simulacions, sota condicions normals i de pluja.

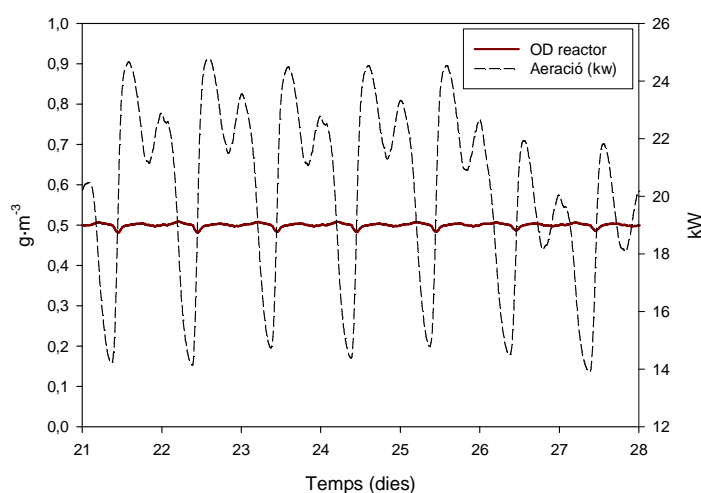
Les estratègies T_3 i T_4 continuen sense nitrificar i superant el límit legal d'abocament del nitrogen durant tot el temps que dura la simulació i el SCLD_N2 aconsegueix el millor rendiment d'eliminació, amb els valors més baixos en els índexs QE i QEN.

Taula 5.23. Concentracions mitjanes del nitrogen de l'efluent resultants de les simulacions amb l'escenari tempesta (condicions de pertorbació)

ESTRATÈGIES D'AERACIÓ				ESCENARI TEMPS TEMPESTA (Concentracions mitjanes N efluent)		
Ref.	0	No control	Llaç Obert	Ntotal (gN·m ⁻³)	NKT (gN·m ⁻³)	NO _x (gN·m ⁻³)
OPCIÓ 1	1		T_1 (86% + 14%)	12.52	10.36	2.16
	2	Aeració temporitzada	T_2 (75% + 25%)	8.80	2.95	5.85
	3		T_3 (67% + 33%)	9.14	7.36	1.77
	4		T_4 (60% + 40%)	23.29	23.11	0.28
	5		Control ON-OFF	CONSIGNES	36.86	36.81
OPCIÓ 2	6	Control PI de l'OD	PC 1	11.40	2.25	9.15
	7		PC 0.5	11.36	2.17	9.19
	8		PC 0.25	8.27	2.96	5.31
	9	SCLD	SCLD_N 1	9.21	7.99	1.22
	10		SCLD_N 2	7.93	4.96	2.97
			SCLD_N 2	6.29	2.55	3.74

Comentari global dels resultats obtinguts en l'estudi de simulació amb el model de l'EDAR Taradell.

Realitzat l'estudi de simulació de les diferents estratègies d'aeració sota condicions de temps sec, pluja i tempesta, les opcions SCLD_N1 i sobretot SCLD_N2 són les que obtenen millors resultats. Ara bé, des del punt de vista de l'estudi de simulació, fixar el punt de consigna de l'OD a 0.5 g·m⁻³ també és una bona opció per aconseguir un bon rendiment de la NDS, sobretot sota condicions de temps sec. No obstant, mentre que per l'estudi de simulacions s'ha ajustat el controlador PI de manera precisa (figura 5.22), en l'EDAR real, quan es treballa amb valors de consigna baixos, l'ajust és difícil ja que l'aeració ha de ser molt precisa.


Figura 5.22. Evolució de l'OD durant la simulació amb el control PI d'OD amb un punt de consigna de 0.5 i la corresponent variació de l'aeració per aconseguir mantenir el punt de consigna.

L'alternativa a l'aeració segons un valor d'OD prefixat suficientment baix per assolir la NDS, són les estratègies basades en SCLD_N, que a més a més, segons l'estudi de simulació, assolixen també la NDS a la vegada que

milloren, sobretot SCLD_N2, els resultats del control de l'OD PI a un PC de $0.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. Les avantatges d'utilitzar un sistema de control d'aquestes característiques és l'anticipació al comportament de l'aigua d'entrada i la facilitat d'interpretació per part del cap de planta del sistema de control, ja que és més entenedor parlar de valors baixos, normals, alts... d'OD i ORP que no pas d'ajustar K_p , T_i , retards dels sensors, etc.

L'opció T_2 de treballar amb una aeració intermitent amb un 75% del temps aeròbic i un 25% anòxic, també presenta bons resultats, similars a l'estratègia PC 0.5, però amb resultats inferiors en totes les situacions respecte la millor opció, SCLD_N2.

V.6. IMPLEMENTACIÓ DEL SCLD_N A L'EDAR TARADELL

Atès que el SCLD_N2 presentava millors resultats en totes les simulacions realitzades, aquest va ser sistema de control escollit per ser implementat a l'EDAR Taradell. El primer pas per dur-ho a terme, va ser identificar aquelles limitacions tècniques o de procés que comportessin la modificació del SCLD_N. A continuació, es va dur a terme l'etapa de programació del SCLD_N amb la corresponent interfície d'usuari que va permetre introduir les restriccions que s'havien identificat prèviament així com la modificació en qualsevol moment dels paràmetres del sistema de control. Finalment, s'inicià l'aeració de l'EDAR Taradell segons el SCLD_N i es va realitzar la corresponent validació del seu funcionament.

V.6.1. Restriccions de l'EDAR Taradell

L'EDAR Taradell presentava una limitació tècnica important que es va haver de tenir en compte a l'hora d'implementar el SCLD_N: el motor dels bufadors no podia treballar per sota de les 740 rpm, de manera que, valors inferiors a aquest límit van ser equiparats a parar l'aeració.

V.6.2. Desenvolupament de l'aplicació informàtica pel SCLD_N

En el cas del SCLD_N, es va desenvolupar un programa amb llenguatge ObjectPascal (Borland® Delphi®) (annex 2) que cridava una funció anomenada 'Fismain' que permetia executar el sistema de control definit directament en la toolbox de lògica difusa de MATLAB (veure apartat III.2.2) a través d'un fitxer amb extensió .fis. El programa va anomenar-se 'Control fuzzy reactor N/D Taradell'.

A través de la pantalla principal del programa desenvolupat s'accedeix al fitxer.fis de MATLAB (figura 5.23 i 5.24), de manera que es poden modificar els següents elements:

- l'univers de discurs de cada variable (OD, ORP i FAer),
- la partició de l'univers de discurs en les cinc etiquetes lingüístiques ('Molt Baix', 'Baix', 'Normal', 'Alt' i 'Molt Alt' en el cas de l'OD i l'ORP i 'Molt Positiu', 'Positiu', 'Cap', 'Negatiu', 'Molt Negatiu' en el cas del FAer),
- les regles de la matriu de decisió (25 regles 'Si-Llavors').

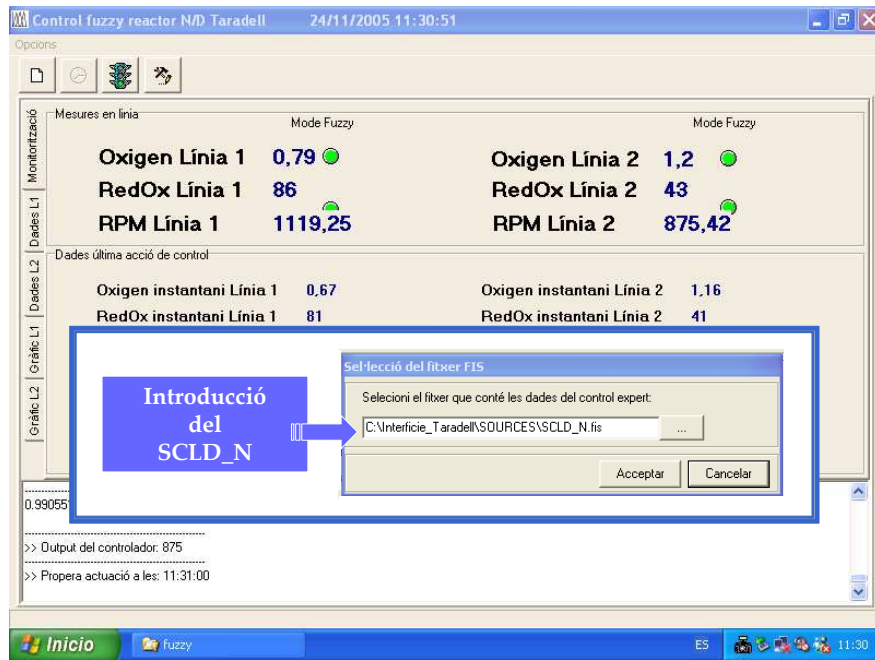


Figura 5.23. Interfície gràfica del programa SCLD_N implementat a l'EDAR Taradell. Exemple de la pantalla principal amb l'activació d'una pantalla secundària per introduir el fitxer.fis que conté la informació del SCLD.

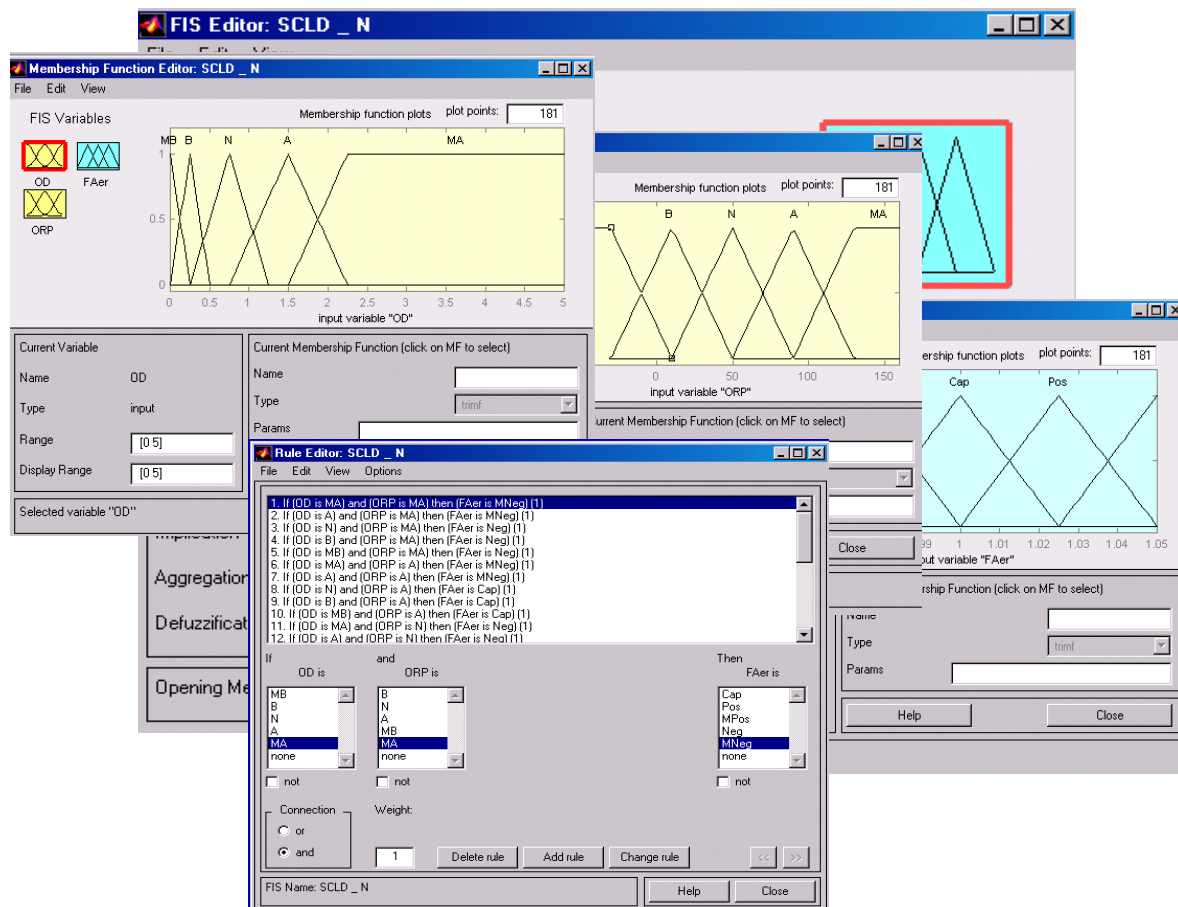


Figura 5.24. Exemple de les pantalles d'edició de les funcions de pertinença i regles 'Si-Llavors' que defineixen el SCLD_N a través del fitxer.fis.

El programa 'Control fuzzy reactor N/D Taradell' monitoritza l'OD, l'ORP i les rpm reals del bufador en línia cada minut. Durant la validació es va fixar que el temps d'execució fos cada minut. Ara bé, aquest temps d'inferència pot modificar-se a través de la interfície del programa. El factor d'aeració que indica el SCLD_N a través del fitxer.fis executat és multiplicat per les rpm reals del bufador i enviat a l'autòmat instantàniament. L'ajust entre l'acció de control que s'envia i la que es produeix és de menys d'un minut; fet comprovat a través del registre històric de les rpm proposades i les reals. Per exemple, a la figura 5.25 s'observa que les rpm de la columna 'Aeració', que correspon a l'aeració que determina el SCLD_N, són similars al valor de 'RPM reals' d'una fila més a baix (un minut màxim de retard).

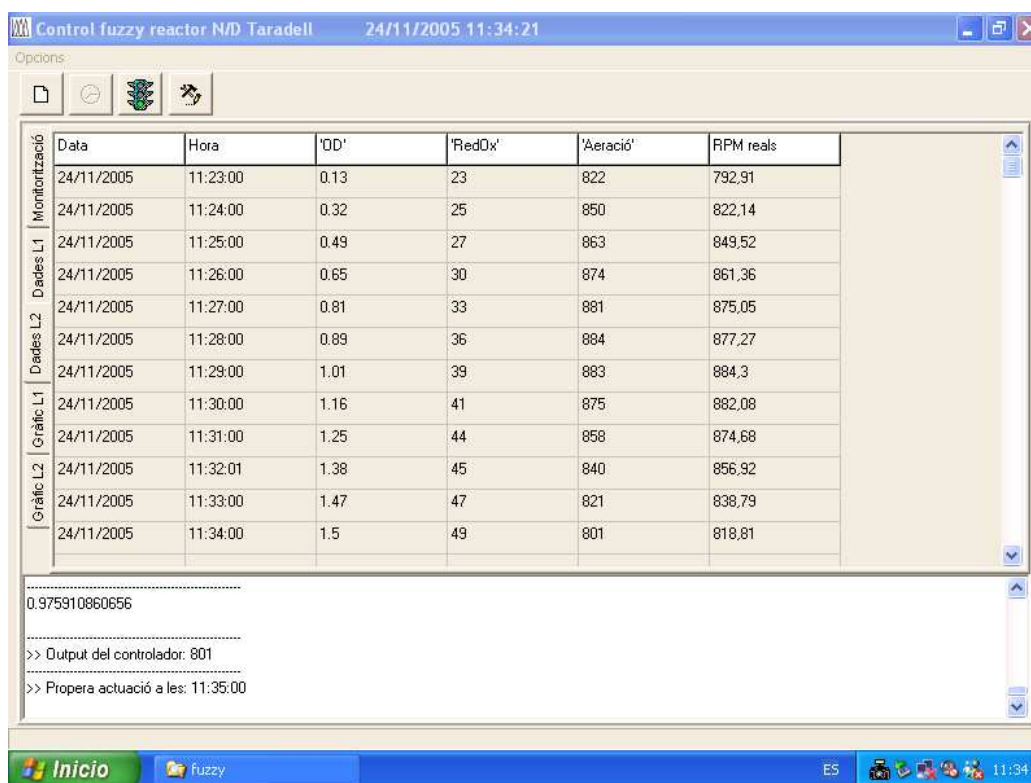


Figura 5.25. Exemple del registre històric de les variables del SCLD_N implementat a l'EDAR Taradell

V.6.3. Validació del SCLD_N a l'EDAR Taradell.

El funcionament del SCLD_N es va validar durant el mes d'octubre del 2005 en una de les dues línies de l'EDAR Taradell, de manera que, la validació es va dur a terme en el carrousel biològic de la línia 2.

Atès que un estudi comparatiu entre l'estratègia d'aeració prèvia a la implementació del SCLD i l'estratègia d'aeració segons el SCLD_N implementat no es podia realitzar seguint el mateix procediment que en l'estudi de simulació, la validació del SCLD va consistir fonamentalment en corroborar el funcionament correcte del SCLD_N implementat a l'EDAR Taradell.

L'ús dels índexs de qualitat de l'efluent (QE, QEN i TVN) requeria un seguiment en continu dels paràmetres de SS, DQO, DBO₅, NKT i NO_x que no es realitzava a l'EDAR Taradell, de manera que aquests índexs no van ser

calculats. En canvi, atès que es van monitoritzar els kW·h que consumia el bufador de la línia 2, es va fer ús dels índexs associats al consum energètic de l'aeració (CEA, CEA_O, CEA_{O2}), relacionant la seva interpretació amb els rendiments d'eliminació que assolía el procés.

Mentre que en l'estudi de simulacions les característiques de composició i cabal de l'aigua d'entrada eren sempre les mateixes per cada estratègia simulada, en l'EDAR Taradell aquestes condicions eren variables en el temps. Això va comportar que no es comparés el funcionament del SCLD_N amb el funcionament de l'aeració per CONSIGNES prèvia a la implementació, d'una manera estricta i quantificable amb els índexs d'avaluació definits. L'opció de comparar les dues línies també va ser descartada ja que no es podia assegurar que el repartiment de l'afluent fos equitatiu, a més de que la recirculació externa no era independent, sinó que s'ajuntava en una arqueta abans de ser retornada a cadascuna de les línies. No obstant, a partir dels resultats que s'obtingueren del seguiment de l'OD, l'ORP i l'aeració proporcionada pel bufador de la línia 2, a més del seguiment analític de la pròpia explotadora de l'EDAR, es va dur a terme la validació del SCLD_N implementat

Abans de posar en funcionament l'aeració segons el SCLD_N, es va realitzar una modificació imprescindible en el mecanisme d'aeració de l'EDAR Taradell. Es va instal·lar un variador de freqüència que permetia la variació del bufador des de les 740 rpm (mínim requerit per qüestions de manteniment mecànic) fins les 1480 rpm.

Amb els primers resultats d'airejar segons el SCLD_N es va constatar que l'aeració mínima fixada en 740 rpm era, en la majoria del temps, superior als requeriments d'oxigen dels processos biològics del reactor, de manera que es produïen salts d'engegades i aturades en la barrera d'aquest valor (gràfic de la figura 5.27). Per tant, la major part del temps, l'aeració mínima proporcionada al reactor era superior als requeriments del procés, la qual cosa comportà que l'objectiu d'obtenir una situació d'estabilitat on es produís la NDS, com succeïa en l'estudi de simulació, fos impossible d'aconseguir. El que es va obtenir va ser una aeració intermitent deguda a que en poc temps s'airejava més del que es necessitava, de manera que a continuació s'aturava el bufador per tornar a valors suficientment baixos. La solució a aquest problema havia de passar per disminuir la capacitat del bufador, la qual cosa no va poder ser duta a terme durant el període de validació.

Les figures 5.26 i 5.27 presenten el perfil típic de l'OD, l'ORP i les rpm de l'Aeració quan s'operava segons CONSIGNES o segons el SCLD_N respectivament. El comportament de les diferents variables representades en el gràfic de la figura 5.26 és similar en tots els registres històrics obtinguts quan l'aeració s'operava segons l'estratègia CONSIGNES, prèvia a la implementació del SCLD_N (en l'annex 3, es recullen gràfics de seguiment de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador de varis dies del mes de maig i juny del 2005, quan l'aeració s'operava en consignes).

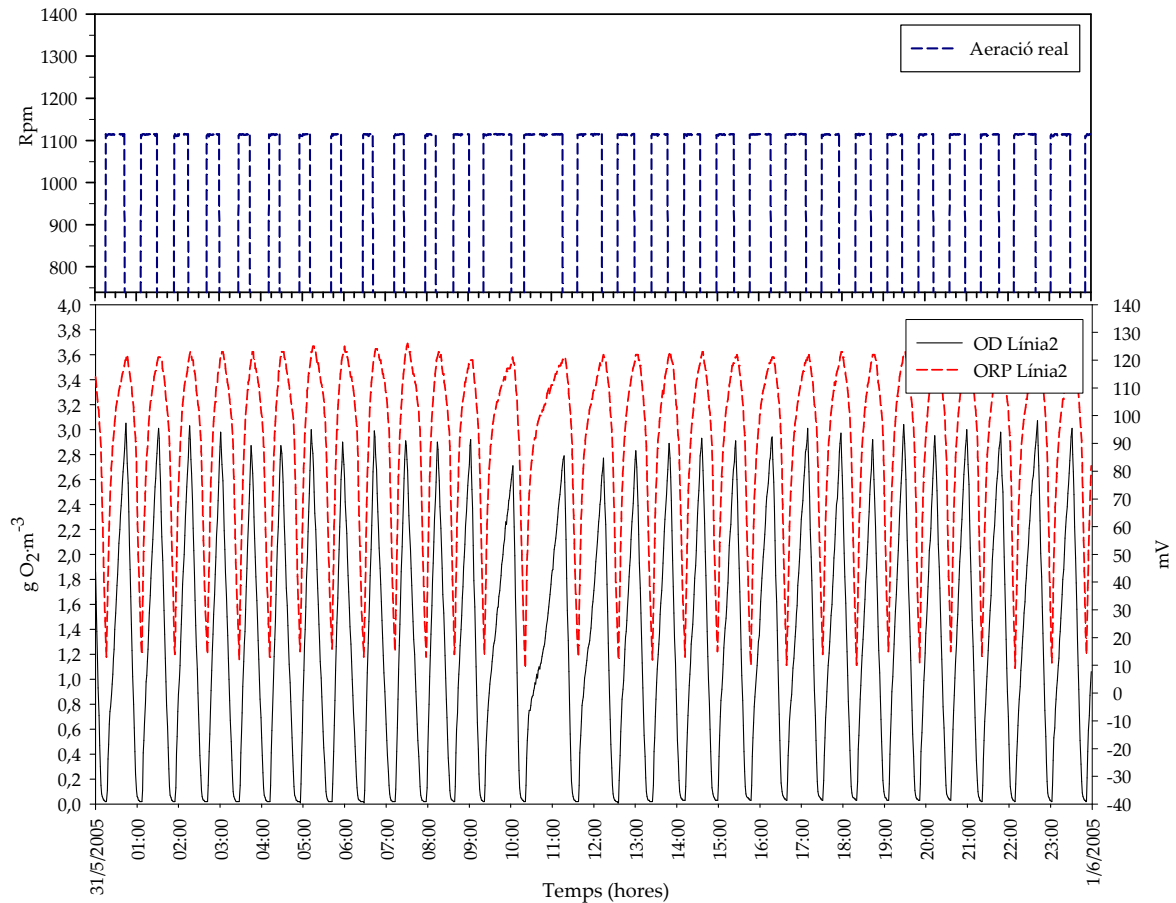


Figura 5.26. Evolució de l'OD, l'ORP, i les rpm reals del bufador per l'aeració segons CONSIGNES a la línia 2 del dia 31 de maig de 2005.

La figura 5.26 presenta una aeració amb engegades i aturades durant les 24 hores, amb valors de 1115 rpm quan funcionava l'aeració, sense possibilitat de valors intermedis. L'OD varia entre 0 i 3 g·m⁻³ mentre que l'ORP varia entre 20 i 125 mV. Aquesta variabilitat era determinada per la configuració del control de CONSIGNES (apartat V.3.4) que tenia com a límit per engegar l'aeració els 20 mV o els 0 gO₂·m⁻³ i per aturar l'aeració els 180 mV o els 3 gO₂·m⁻³, a més de dos temps màxims de seguretat de funcionament (60 minuts) i parada (40 minuts) de l'aeració.

El gràfic de la figura 5.27 presenta un exemple del comportament de les variables OD, ORP i aeració en forma de rpm del bufador de la línia 2 d'un dels dies en que l'aeració operava segons el SCLD_N. Com s'observa en el gràfic, la variabilitat de l'OD és gran, entre 0 i 2 g·m⁻³, degut a les engegades i aturades del bufador. Cal recordar que la situació de la sonda d'OD just al final de la zona de difusors (figura 5.6) comporta que els valors d'OD responguin immediatament a l'engegada i aturada de l'aeració. La variabilitat de l'ORP és molt menor ja que la seva dinàmica és molt més lenta. S'observa com els valors d'ORP oscil·len entre els 20 i 60 mV, mentre que en l'aeració segons CONSIGNES, donava lloc a un interval molt més gran, entre 20 i 125 mV. En la part superior del gràfic s'aprecia com les engegades - aturades de l'aeració augmenten a partir de les 10:00 hores del matí, quan la càrrega de l'afluent és major. De les 24:00 a les 10:00 les engegades disminueixen significativament, essent els temps d'aturada més grans. Aquest comportament es repeteix en els dies en què es va operar l'aeració segons el

SCLD_N (en l'annex 3, es recullen gràfics de seguiment de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador de diversos dies del mes d'octubre del 2005 quan l'aeració s'operava segons el SCLD_N).

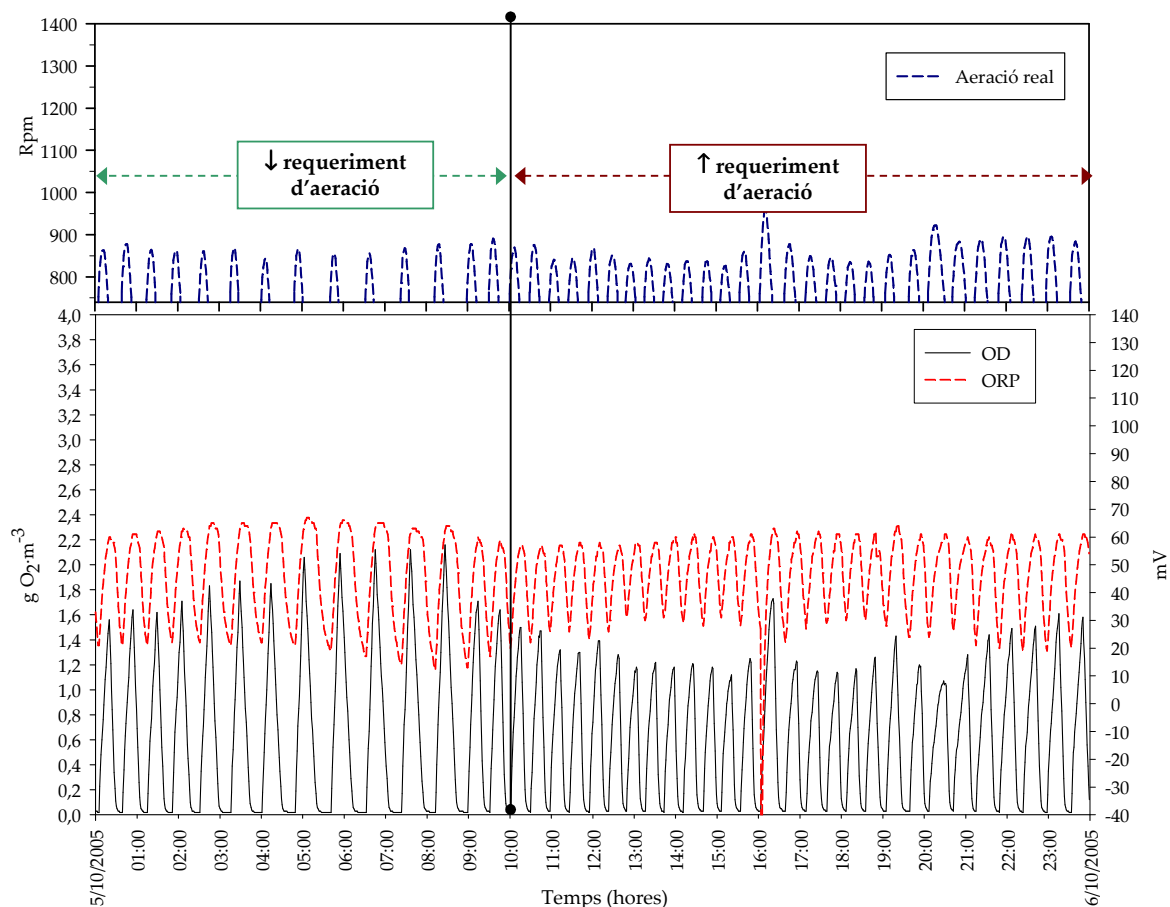


Figura 5.27. Evolució de l'OD, l'ORP, l'aeració real segons el SCLD_N a la línia 2 del dia 5 d'octubre de 2005.

La variabilitat de l'OD, l'ORP i l'aeració és menor en el gràfic de la figura 5.27 que el de la figura 5.26. Encara que el consum energètic del dia 31/5/2005 amb operació de l'aeració segons CONSIGNES (figura 5.26) va ser de 201.2 Kw h · d⁻¹ i el dia 5/10/2005 (figura 5.27) amb operació de l'aeració segons SCLD_N va ser de 125.47 Kw h · d⁻¹ indiquen que amb SCLD_N s'ha utilitzat menys energia, cal tenir en compte la càrrega d'entrada per fer una comparació real de l'energia utilitzada per obtenir el mateix rendiment d'eliminació.

Les taules 5.24 i 5.25 presenten la relació de rendiments d'eliminació de MO i N així com els consums energètics segons els índexs CEA, CEA_O i CEA_{O2} (equacions 5.3, 5.5 i 5.6) quan l'aeració s'operava segons CONSIGNES i segons el SCLD_N.

Com s'ha explicat en l'apartat V.3.5, els rendiments d'eliminació del nitrogen i MO en l'EDAR Taradell abans de la implementació del SCLD ja es trobaven per sobre del 90%. De manera que, el propòsit del SCLD va basar-se en mantenir els bons rendiments d'eliminació a la vegada que es disminuïa el consum energètic. A la taula 5.24 es presenten els cabals diaris i rendiments d'eliminació de MO i N durant l'operació de l'aeració segons

CONSIGNES i SCLD_N i a la taula 5.25 es presenten els resultats de consum energètic d'aquells dies que es comptava amb les dades necessàries per calcular els tres índexs: CEA, CEA_Q i CEA_{O₂}.

Els resultats obtinguts van ser positius: mentre que el rendiment d'eliminació de la MO i el N va continuar essent elevat (taula 5.24), el consum del bufador de la línia 2 va ser, en termes generals, menor que quan s'operava amb CONSIGNES (taula 5.25).

Els rendiments d'eliminació de DQO presentats a la taula 5.24 es mantenen en tots els dies de validació, per sobre del 90% d'eliminació, amb valors de DQO de sortida molt per sota del límit legal d'abocament (125 g · m⁻³). El procés de nitrificació és produeix completament en tots els dies de validació, amb valors d'amoni de sortida sempre per sota dels 0.5 g N · m⁻³, amb rendiments gairebé del 100% en tots els dies. Respecte la desnitrificació, és només en els dos últims dies de la taula (17 i 26 d'octubre) que no és completa, amb valors de NO_x⁻ de 6.3 i 8.4 gN · m⁻³ respectivament. Aquest fet va ser degut al període de pluges que es van produir durant la segona quinzena d'octubre, comportant una disminució de càrrega a l'entrada i una sobreaeració impossible d'evitar al reactor, ja que el mínim d'aeració era molt superior als requeriments del procés.

Taula 5.24. Rendiments d'eliminació de MO i N durant l'operació de l'aeració segons CONSIGNES i SCLD_N i cabals d'entrada.

	Data	Cabal (m ³ · d ⁻¹)	DQO (gO ₂ · m ⁻³)			NH ₄ ⁺ (gN · m ⁻³)			NO _x ⁻ (gN · m ⁻³)
		ent.	ent.	sort.	rend. (%)	ent.	sort.	rend.(%)	sort.
CONSIGNES	30/05/2005	1215	1091	34	96.9	106	0.00	100	0.52
	31/05/2005	1022	992	57	94.2	90	0.10	99.9	1.45
	06/06/2005	1159	883	46	94.8	50	0.00	100	2.52
	23/06/2005	1022	870	63	92.7	64	0.00	100	1.28
	27/06/2005	1212	1010	35	96.5	95	0.00	100	1.26
SCLD_N	28/09/2005	1135	505	20	96.0	66	0.10	99.8	1.00
	03/10/2005	1090	764	55	92.8	96	0.40	99.6	1.00
	05/10/2005	1091	641	54	91.6	68	0.00	100	2.90
	10/10/2005	993	905	61	93.2	47	0.00	100	1.70
	17/10/2005	2880	219	11	94.5	21	0.20	99.0	6.30
	26/10/2005	1699	403	11	97.3	40	0.2	99.5	8.4

Segons els resultats del consum energètic de la taula 5.25, mentre que els valors de l'índex CEA són clarament inferiors els dies en que es treballa amb el SCLD_N, aquesta diferència és més petita quan es comparen els valors de CEA_{O₂}, que tenen en compte la càrrega d'entrada a eliminar. Els valors de l'índex CEA_{O₂} són més variables en els dies en que s'opera l'aeració segons CONSIGNES, amb un rang entre 0.099 i 0.189, mentre que els dies en que s'opera segons el SCLD_N, el límit superior no supera el valor de 0.141. No obstant, s'observa com el promitjos dels valors dels tres índexs quan s'opera segons el SCLD_N són menors que quan s'opera amb CONSIGNES, mentre que els rendiments d'eliminació de DQO i amoni, els dos processos amb requeriment d'oxigen, presenten valors similars, tal i com s'observa en la taula 5.24.

Taula 5.25. Resultats del consum energètic de l'aeració quan s'opera segons CONSIGNES (estratègia prèvia) i segons SCLD_N. Càlcul dels índex CEA, CEA_Q i CEA_{O₂}.

	Data	CEA Kw h · d ⁻¹	CEA _Q Kw h · m ⁻³	CEA _{O₂} Kw h · kg DQO ⁻¹
CONSIGNES	30/05/2005	188.690	0.155	0.099
	31/05/2005	201.200	0.197	0.140
	06/06/2005	243.508	0.210	0.189
	23/06/2005	205.144	0.201	0.173
	27/06/2005	163.768	0.135	0.093
	Promig	200.46	0.180	0.139
SCLD_N	28/09/2005	127.045	0.112	0.139
	03/10/2005	124.100	0.114	0.095
	05/10/2005	125.473	0.115	0.121
	10/10/2005	156.518	0.158	0.141
	17/10/2005	110.178	0.038	0.121
	26/10/2005	109.218	0.064	0.110
	Promig	125.42	0.100	0.121

En base als resultats obtinguts durant el primer mes de funcionament del SCLD_N a la línia 2, el següent objectiu dels explotadors és introduir-lo a la línia 1, on actualment s'està adequant el bufador perquè es pugui implementar aquest sistema de control.

V.7. DISCUSSIÓ SOBRE EL PROCÉS DE DISSENY, IMPLEMENTACIÓ I VALIDACIÓ DEL SCLD_N.

A l'EDAR Taradell l'EBNi en condicions normals no era un problema, ja que els seus rendiments eren correctes. Ara bé, l'objectiu de minimitzar el consum energètic mantenint el nivell d'eliminació no havia estat present a l'hora de decidir l'estratègia d'aeració. Amb la implementació del SCLD_N no només es van mantenir els rendiments d'eliminació del nitrogen, sinó que a més, es va aconseguir estalviar energia, aspecte a tenir en compte quan l'aeració és un dels paràmetres de major contribució en el consum energètic de les EDAR.

Per dissenyar el SCLD_N es van escollir variables indirectes del procés d'eliminació del Nitrogen, l'OD i l'ORP; variables que la majoria d'EDAR tenen disponibles a temps real. Recórrer a mesures de concentracions de nitrogen en línia hagués comportat la dificultat d'implementar el SCLD_N, ja que actualment, l'ús d'aquests analitzadors no es troba a l'abast de la majoria d'EDAR.

La utilització de la lògica difusa va permetre introduir en el mateix sistema de control situacions que podien semblar incoherents (com per exemple: OD baix i ORP elevat). En el desenvolupament de les regles 'Si-Llavors' va ser important tenir en compte la dinàmica i comportament dels valors de les dues variables, ja que la resposta de l'OD a un canvi d'aeració era molt més ràpida que no pas la de l'ORP, de manera que, per exemple, al parar el bufador, en poc temps l'OD podia presentar valors baixos mentre que l'ORP no havia disminuït, presentant encara valors elevats. Pel que fa a l'aeració, decidir com havia d'indicar l'aeració el SCLD_N (amb un valor discret

o amb un increment) va ser un factor clau. La determinació de treballar amb increments positius o negatius de l'aeració va permetre que el SCLD_N s'ajustés millor a les necessitats del procés.

A l'igual que en el capítol anterior, la implicació del cap de planta aportant la seva experiència, tant en la definició de les variables difuses com en les regles 'Si-Llavors', va comportar que el SCLD_N fos acceptat des d'un bon principi i que després de la seva implementació fos una eina fàcil d'entendre i utilitzada per l'equip tècnic de l'EDAR.

La metodologia emprada va ser la mateixa que en l'anterior capítol, encara que es van adaptar algun dels apartats. En concret, l'estudi de simulació va modificar-se ja que no es va utilitzar el model de la planta Benchmark degut a la seva configuració, molt diferent al carrousel d'oxidació que presenta l'EDAR Taradell. La modelització del carrousel de l'EDAR Taradell es va dur a terme tenint en compte consideracions proposades en la tesi d'A. Abusam (2001), qui aporta una metodologia de modelització dels carrousel d'oxidació i la posterior avaluació de diferents sistemes de control. No obstant, es van continuar utilitzant alguns dels índexs d'avaluació del protocol Benchmark (Copp, 2002) i sobretot, es van dur a terme les simulacions sota els escenaris predefinitos. En aquest capítol es mostra la utilitat d'aquests escenaris quan no es compta amb suficients dades en continu per caracteritzar l'entrada d'una manera dinàmica en el temps. A la vegada, gràcies a l'ús d'aquests escenaris, es van poder dur a terme simulacions sota diverses condicions (temps sec, de pluja i de tempesta).

Els índexs de procés del protocol Benchmark (qualitat de l'efluent, violacions de l'efluent i consum de l'aeració) van ser calculats en l'estudi de simulació. Ara bé, aquests mateixos índexs no van ser utilitzats directament en la validació del SCLD_N implementat, ja que a l'EDAR de Taradell no es comptava amb el registre en línia de les variables necessàries; a excepció del consum energètic de l'aeració, del qual sí que es va realitzar un seguiment en temps real. Ara bé, l'objectiu dels índexs d'avaluació de quantificar els rendiments d'eliminació i compliment de la normativa va mantenir-se en la validació, recorrent als resultats analítics que es duen a terme en l'EDAR.

El SCLD_N va ser implementat a la línia 2 de l'EDAR Taradell amb la corresponent adquisició de dades en temps real de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador. Abans d'iniciar l'operació de l'EDAR segons el SCLD_N es va instal·lar un variador de freqüència al bufador de la línia 2 per tal que l'aeració es pogués regular en lloc de funcionar només en dues posicions (engegada (1115 rpm) / aturada (0 rpm)). Per tant, la validació del SCLD_N es va dur a terme sobre una única línia, amb perspectiva d'implementar-lo en l'altra un cop validat. Es va descartar comparar el funcionament de l'aeració del SCLD_N de la línia 2 amb l'aeració segons CONSIGNES de la línia 1 perquè no es disposava del registre en línia de les variables d'OD, ORP i rpm del bufador de la línia 1, ni del seguiment analític del rendiment d'eliminació del nitrogen (entrada / sortida dels reactors) d'ambdues línies per separat.

En referència al consum energètic de l'aeració, mentre que per simulació es comparaven els valors de l'índex CEA en unitats de $\text{kw}\cdot\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$, per la validació del SCLD_N implementat, aquesta comparació no va ser tant senzilla ja que a l'EDAR real no es produeixen condicions idèntiques de cabal i composició d'entrada, que permetin

comparar el consum energètic de l'aeració d'una manera equitativa. Per poder dur a terme aquesta comparació, es va modificar l'índex CEA donant lloc a dos índexs nous de consum energètic: un que considerava els metres cúbics a tractar (CEA_O) i un altre que tenia en compte la càrrega d'entrada (CEA_{O2}) a l'hora de quantificar els kwh consumits per l'aeració. Val a dir que les comparacions dels valors d'aquests índexs de consum, tant en els estudis de simulació com de validació, han estat sempre relacionades amb els rendiments d'eliminació obtinguts.

Les restriccions tècniques de l'EDAR Taradell van limitar significativament el funcionament del SCLD_N a la realitat. Mentre que en l'estudi de simulació, airejar segons el SCLD_N comportava estalvis energètics significatius en comparació a altres estratègies d'aeració, en la realitat, no va es poder corroborar del tot. Mentre que per simulació, s'havia aconseguit un procés de NDS en el carrousel amb una aeració força constant, en la realitat, a causa de la limitació mínima de l'aeració (740 rpm del bufador), el comportament de l'aeració va ser d'engegades i aturades, de manera que el consum energètic no es podia reduir significativament respecte l'operació de l'aeració prèvia basada en engegades i aturades. Ara bé, la introducció d'un variador de freqüència va comportar que el consum disminuís durant les engegades, a més d'una millor adaptació de l'aeració als requeriments del procés, disminuint considerablement l'aeració durant els períodes de baixa càrrega que es produïen al llarg del dia (normalment de matinada).

La solució de disminuir el mínim de cabal d'aire que podia aportar el bufador no va ser possible, de manera que, només en el cas que augmentés la càrrega d'entrada, es preveu que l'aeració fixada segons el SCLD_N es comporti de manera similar als estudis de simulació. En aquest treball queda reflexada la divergència entre els resultats de les simulacions i els de la implementació en l'EDAR real, a causa de les limitacions tècniques de la instal·lació.

CONCLUSIONS



VI. CONCLUSIONS

En la present tesi s'han implementat i validat dos Sistemes de Control basats en Lògica Difusa (SCLD) per Sistemes de Fangs Activats en dues EDAR reals: un SCLD pels Sòlids en Suspensió de l'efluent (SCLD_SS) a l'EDAR Granollers i un SCLD per l'eliminació biològica del Nitrogen a l'EDAR Taradell (SCLD_N).

Per assolir la implementació d'aquests dos SCLD s'ha seguit una metodologia que s'ha mostrat adequada a les necessitats plantejades. En concret, aquesta metodologia s'ha dividit en els següents passos:

1. Definició d'objectius: s'han establert els objectius a aconseguir pels SCLD.
2. Anàlisi del problema: s'han estudiat les EDAR on s'havien d'implementar els SCLD.
3. Desenvolupament d'índexs: s'han definit un conjunt d'índexs d'avaluació i comparació per quantificar el compliment dels objectius preestablerts.
4. Disseny dels SCLD: s'han identificat i seleccionat les variables que havien de formar part dels sistemes de control, s'han definit les variables en el llenguatge de la lògica difusa, s'han desenvolupat les matrius de decisió i s'han seleccionat els mètodes de composició, inferència i defuzzificació.
5. Avaluació i selecció d'alternatives: s'han dut a terme les avaluacions per simulació de les diferents opcions de SCLD mitjançant el càlcul dels índexs prèviament definits.
6. Implementació dels SCLD: s'han programat i implementat aplicacions informàtiques i s'han dissenyat les corresponents interfícies d'usuari per facilitar a l'expert la configuració dels paràmetres del SCLD (variables i regles difuses).
7. Validació en EDAR: s'ha validat el funcionament dels SCLD a les respectives EDAR.

Aquesta metodologia ha demostrat ser adient pels dos casos d'estudi que es presenten (SCLD_SS i SCLD_N) i l'experiència obtinguda obra les portes a la seva possible extrapolació a altres casos similars.

De l'experiència adquirida durant el desenvolupant del present treball de Tesi Doctoral, s'extreuen les següents conclusions generals:

- √ El conjunt de dades quantitatives (disponibles en línia amb sensors o amb un cert retard si són analítiques de laboratori), i el nivell d'instrumentació que presenta una EDAR per fer un seguiment en continu dels

paràmetres dels processos, determinen i condicionen la possibilitat d'introduir controls automàtics en la seva operació.

- √ És fonamental estudiar les EDAR on es volen implementar els SCLD com a primer pas del procés de disseny dels sistemes de control. Així, cal conèixer al detall les particularitats d'aquestes instal·lacions, amb l'objectiu que el SCLD a dissenyar s'ajusti al màxim a la instrumentació disponible, i així garantir l'èxit de la seva implementació a l'EDAR.

- √ La implementació de sistemes de control avançats no és incompatible amb nivells baixos d'instrumentació i monitoratge que pugui presentar una EDAR. En aquesta tesi s'ha presentat la implementació de dos SCLD que utilitzen paràmetres senzills de mesurar, de baix cost i que es troben en la majoria d'EDAR (cabal d'entrada i IVF pel SCLD_SS; Oxigen Dissolt (OD) i Potencial d'Òxido-Reducció (ORP) pel SCLD_N). Tot i l'ús d'elements senzills d'instrumentació, els sistemes de control desenvolupats i implementats han demostrat funcionar de manera correcta i satisfactòria.

- √ La definició d'índexs és un aspecte molt important per dur a terme una correcta avaluació i comparació dels SCLD. Cal que aquests índexs s'adeqüin als objectius establerts.
 - Per avaluar el comportament del SCLD_SS s'han definit tres índexs d'avaluació basats en els índexs predefinitos del protocol Benchmark: 1) Qualitat de l'Efluent segons els Sòlids en Suspensió (QE_{ss}), 2) Temps de Violació del límit legal d'abocament dels Sòlids en Suspensió (TV_{ss}) i 3) Consum de l'Energia de Bombeig del cabal de recirculació (CEB_{rec}). També s'ha desenvolupat un quart índex d'avaluació: 4) Estabilitat del Decantador (CumED) que té com objectiu quantificar l'estabilitat del decantador mitjançant el grau de variabilitat dels fangs del decantador respecte una situació de referència.

 - Per al cas de SCLD_SS també s'han definit quatre índexs addicionals de caràcter comparatiu: 1) Diferència de la Qualitat de l'Efluent segons els Sòlids en Suspensió (DQE_{ss}), 2) Diferència del Temps de Violació del límit legal d'abocament dels Sòlids en Suspensió (DTV_{ss}), 3) Diferència del Consum d'Energia de Bombeig del cabal de recirculació (DCEB_{rec}) i 4) Diferència de l'Estabilitat del Decantador (DCumED). Aquests índexs tenen com a finalitat quantificar la variació de les estratègies de control proposades respecte a una situació de referència. En concret, per al cas del SCLD_SS aplicat a l'EDAR Granollers, l'estratègia de control de referència que s'ha emprat correspon a una gestió del decantador basada en el manteniment d'un cabal de recirculació constant independentment de l'estat del procés.

-
- Per avaluar el comportament dels SCLD_N s'han definit sis índexs d'avaluació basats en els índexs predefinits pel protocol Benchmark: 1) Qualitat de l'Efluent (QE), 2) Qualitat de l'Efluent segons el Nitrogen (QEN), 3) Temps de Violació del límit legal d'abocament del Nitrogen (TVN), 4) Consum Energètic de l'Aeració (CEA), 5) Consum Energètic de l'Aeració segons el cabal d'entrada (CEAO) i 6) Consum Energètic de l'Aeració segons la càrrega d'entrada (CEAO2).
- √ La definició de les variables difuses i de les regles de decisió dels SCLD s'ha dut a terme, fonamentalment, en base al coneixement teòric i a les dades històriques de les EDAR. No obstant, també s'ha tingut en compte l'experiència dels responsables del procés, sobretot quan no s'han pogut obtenir registres històrics complets que facilitin l'estudi acurat dels processos a controlar.
- √ Els estudis de simulació són necessaris per avaluar i comparar els SCLD que es presenten en aquesta tesi.
- L'avaluació del SCLD_SS s'ha dut a terme mitjançant simulacions amb dos models diferents: el model Benchmark i el model de l'EDAR Granollers.
 - L'avaluació del SCLD_N s'ha dut a terme amb el model de l'EDAR Taradell, però amb la caracterització de l'aigua d'entrada basada en els escenaris predefinits del protocol Benchmark.
- √ L'ús del protocol Benchmark aporta objectivitat a l'estudi de simulació. Al mateix temps, permet la comprensió i discussió dels resultats arreu de la comunitat científica d'aquest àmbit. L'adaptació d'aquest protocol realitzada en els capítols IV i V, ha permès obtenir una metodologia adequada per poder avaluar els SCLD correctament.
- En el cas del SCLD_SS, l'adaptació del protocol Benchmark ha comportat introduir valors d'IVF variables al llarg del temps, ja que el model de la planta Benchmark no inclou variabilitat en les condicions de sedimentació del fang.
 - En el cas del SCLD_N, l'adaptació del protocol Benchmark ha implicat modificar la configuració de la planta Benchmark, ja que aquesta no s'adequa a una configuració de carrousel d'oxidació, on s'havia d'avaluar el SCLD_N. S'ha substituït la planta Benchmark per la configuració de l'EDAR Taradell.
- √ L'ús dels escenaris predefinits pel protocol Benchmark han estat una eina important per l'avaluació del comportament dels SCLD sota condicions diferents d'entrada de l'EDAR. A més, en el cas de l'EDAR Taradell, on no existien dades en continu de cabal i composició d'entrada, aquests escenaris han facilitat la realització de simulacions en dinàmic.
-

- √ En el cas del SCLD_SS, s'ha comprovat que l'ús de dades reals, comporta no haver pogut explorar completament per simulació, la superfície de resposta de les matrius de decisió dels SCLD_SS.

- √ Tot i haver adaptat les EDAR Granollers i Taradell als models de simulació, hi ha hagut limitacions físiques i d'operació de l'EDAR i limitacions del propi model de simulació, que han comportat que sota algunes condicions, el comportament dels processos simulats no descriu completament la realitat.
 - En el cas de l'EDAR Granollers, les característiques d'un decantador amb recollida de fangs per succió, no van poder ser introduïdes en la plataforma de simulació GPS-X.

 - En el cas de l'EDAR Taradell, els valors d'ORP no van poder ser introduïts en el model d'eliminació biològica del Nitrogen, de manera que l'ORP va ser introduït com a valors de concentracions de Nitrats. A més, les especificacions tècniques del bufador tampoc van poder ser introduïdes al programa GPS-X, de manera que no es va poder limitar l'aeració proporcionada pel bufador a 740rpm.

- √ Els estudis de validació dels SCLD implementats a les EDAR, han permès confirmar el bon funcionament dels dos sistemes de control.
 - La implementació del SCLD_SS ha permès gestionar correctament els decantadors de l'EDAR Granollers a partir de la regulació automàtica del cabal de recirculació, segons el cabal d'entrada i les condicions de sedimentació del fang. Com a resultat, s'ha disminuït la concentració de SS a l'efluent.

 - La implementació del SCLD_N ha permès regular correctament l'aeració de la línia 2 de l'EDAR Taradell en funció dels valors d'OD i ORP. Encara que el funcionament del sistema de control s'ha vist limitat per les característiques tècniques del bufador, s'han mantingut bons rendiments d'eliminació del nitrogen a la vegada que el consum energètic de l'aeració ha disminuït.

- √ La implementació dels SCLD també ha estat positiva des del punt de vista d'acceptació entre els responsables i operaris de les EDAR. La implicació del personal tècnic de les EDAR Granollers i Taradell en el disseny dels SCLD, ha comportat que, un cop implementats, aquests siguin acceptats i utilitzats en les respectives EDAR. A més, la relació entre les variables discretes i la seva transformació en variables difuses ha facilitat als responsables del procés, entendre i manipular aquests tipus de sistemes de control.

Com a conclusió final, es pot afirmar que els SCLD desenvolupats i implementats a l'EDAR Granollers i Taradell són una eina útil i fiable pel control dels processos d'un sistema de fangs activat: d'una banda per millorar el control de la concentració de SS de l'efluent (SCLD_SS), i d'altra, per millorar el procés d'eliminació biològica

del Nitrogen (SCLD_N). Aquestes millores no només s'han relacionat amb un augment de la qualitat de l'efluent sinó també en una millor gestió del decantador, en el cas del SCLD_SS i, en una reducció dels costos energètics, en el cas del SCLD_N. Finalment, s'ha constatat que l'ús de la lògica difusa en la implementació de sistemes de control en EDAR reals urbanes, pot ser una eina vàlida per millorar la gestió d'aquestes instal·lacions, a la vegada que es converteix en un instrument de fàcil comprensió i acceptació entre l'equip tècnic de les EDAR.

BIBLIOGRAFIA



VII. BIBLIOGRAFIA

- A**busam, A. (2001). *Development of benchmarking methodology for evaluating oxidation ditch control strategies*. Tesi doctoral. Wageningen University, The Netherlands.
- Abusam, A., Keesman, K.J., Spanjers, H., van Straten, G., Meinema, K. (2002). Evaluation of control strategies using an oxidation ditch benchmark. *Water Sci. Technol.*, **45** (4-5), 151-158.
- Adroer, M., Alsina, A., Aumatell, J. i Poch, M. (1999). Wastewater neutralization control based on fuzzy logic: experimental results. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **38**, 2709-2719.
- Alex, J., Beteau, J.F., Copp, J.B., Hellinga, C., Jeppsson, U., Marsilli-Libelli, S., Pons, M.N., Spanjers, H., i Vanhooren, H. (1999). Benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plants. *Proceedings of the European Control Conference, ECC'99, Karlsruhe, Alemania*.
- Altrock, C., Arend, H., Krause, B., Steffens, C., i Behrens-Rommler, E. (1993). *Customer-adaptive fuzzy control of home heating system*. IEEE Press, Piscataway, NJ, 115-119.
- Andújar, J. M. i Bravo, J. M. (2005) Multivariable fuzzy control applied to the physical-chemical treatment facility of a Cellulose factory. *Fuzzy Set. Syst.*, **150**, 475-492.
- APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), WEF (Water Environmental Federation) (1998). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. 20 ed., APHA, Washington D.C.
- Åström, K.J. i Wittenmark, B. (1997). *Computer Controlled Systems*. 3rd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, N J.
- B**aeza, J.A. (1999). *Desarrollo e implementación de un sistema supervisor para la gestión y control de EDAR*. Tesi doctoral. Departament d'Enginyeria Química, Escola Tècnica superior d'Enginyeries, Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona.
- Bandler, W. i Kohout, L.J. (1980). Fuzzy power sets and fuzzy implication operator. *Fuzzy Set Syst.*, **4**, 13-30.
- Bongards, M. (2001). Improving the efficiency of a wastewater treatment plant by fuzzy control and neural networks. *Water Sci. Technol.*, **43**, 189-196.
- Brdys, M. A. i Díaz Maíquez, J. (2002). Application of fuzzy model predictive control to the dissolved oxygen concentration tracking in an activated sludge process. *IFAC 15th Triennial World Congress, Barcelona*.
- C**adet, C., Béteau, J. F. i Carlos Hernandez, S. (2004). Multicriteria control strategy for cost/quality compromise in Wastewater Treatment Plants. *Control Eng. Pract.*, **12**, 335-347.
- Carrasco, E. F., Rodríguez, J., Puñal, A., Roca, E. i Lema, J. M. (2002). Rule-based diagnosis and supervision of a pilot-scale wastewater treatment plant using fuzzy logic techniques. *Expert Syst Appl.*, **22**, 11-20.
- Carrasco, E. F., Rodríguez, J., Puñal, A., Roca, E. i Lema, J. M. (2004). Diagnosis of acidification states in an anaerobic wastewater treatment plant using a fuzzy-based expert system. *Control Eng. Pract.*, **12**, 59-64.
- Chang, W. C., Ouyang, C. F., Chiang, W. L. i Hou, C. F. (1998). Sludge pre-recycle control of dynamic enhanced biological phosphorus removal system: an application of on-line fuzzy controller. *Water Res.*, **32**, 727-736.
- Chen, S-M., Horng, Y-J. i Lee, C-H. (2001a) Document retrieval using fuzzy-valued concept networks. *IEEE T Syst. Man CY B*, **31**, 111-118.
-

- Chen, W. C., Chang, N-B. i Shieh, W. K. (2001b). Advanced Hybrid Fuzzy-Neural Controller for Industrial Wastewater Treatment. *J. Environ. Enging.*, **127**, 1048-1059.
- Chen, H-W. i Chang, N-B. (2002) A comparative analysis of methods to represent uncertainty in estimating the cost of constructing wastewater treatment plants. *J. Environ. Manage.*, **65**, 383-409.
- Chen, W. C., Chang, N-B. i Chen, J-C. (2003). Rough set-based hybrid fuzzy-neural controller design for industrial wastewater treatment. *Water Res.*, **37**, 95-107.
- Clara, N. (2004). *Estudi de mètodes de classificació borrosa i la seva aplicació a l'agrupació de zones geogràfiques en base a diverses característiques incertes*. Tesi doctoral. Departament d'Empresa, Universitat de Girona, Girona.
- Colprim, J. (1998). *Estudi del comportament de sistemes biològics de depuració d'aigües residuals mitjançant models mecanistics optimitzant la informació disponible de les dades obtingudes en línia*. Tesi doctoral. Departament d'Enginyeria Química Agrària i Tecnologia Agroalimentària. Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental. Universitat de Girona, Girona.
- Comas, J. (2000). *Development , Implementation and Evaluation of an Activated Sludge Supervisory System for the Granollers WWTP*. Tesi doctoral. Departament d'Enginyeria Química Agrària i Tecnologia Agroalimentària. Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental. Universitat de Girona, Girona.
- Comas, J., Rodríguez-Roda, I., Sánchez-Marré, M., Cortés, U., Freixó, A., Arraez, J. i Poch, M. (2003). A Knowledge – Based Approach to the Deflocculation Problem: integrating On-line, Off-line, and Heuristic information. *Water Res.*, **37**, 2377-2387.
- Comas, J., Rodríguez-Roda, I., Poch, M., Gernaey, K. V., Rosen, C. i Jeppsson, U.(2005). Extension of the IWA/COST simulation benchmark to include expert reasoning for system performance evaluation. *Water Sci. Technol.*, accepted.
- Copp, J.B. (2002). *The COST simulation benchmark: description and simulator manual. A product of COST Action 624 and COST Action 682*. Office for Official Publications of the European Community, Luxembourg.
- Cox, E. (1993). Adaptive fuzzy systems. *IEEE Spectrum*, Febrer, 27-31.
- Cox, E. (1999). *The Fuzzy systems handbook : a practitioner's guide to building, using, and maintaining fuzzy systems*. 2nd ed. Academic Press Professional, San Diego.
- D**eclerq, J., Devisscher, M., Boonen, I., Defrancq, J i Vanrolleghem, P.A. (2005). Analysis and simulation of the sludge profile dynamics in a full scale clarifier. *J Chem. Technol. Biot.*, **80**, 523-530.
- Dombi, J. (1982). A general class of fuzzy operators, the De Morgan class of fuzzy operators and fuzziness induced by fuzzy operators. *Fuzzy Set. Syst.*, **8**, 149-163.
- Driankov, D., Hellendoorn, H. i Reinfrank, M. (1993). *An introduction to fuzzy control*. Springer-Verlag, New York, USA.
- Du, Y. G., Tyagi, R. D. i Bhamidimarri, R. (1999). Use of fuzzy neural-net model for rule generation of activated sludge process. *Process Biochem.*, **35**, 77-83.
- Dubois, D. i Prade, H. (1986). New results about properties and semantics of fuzzy set-theoretic operators. In P.P. Wang and S.K. Chang (eds.), *Fuzzy Sets*, 59-75. Plenum Press, New York, USA.

- E**gusa, Y., Akahori, H., Morimura, A., i Wakami, N. (1992). An electronic video camera image stabilizer operated on fuzzy theory. *IEEE international conference on fuzzy systems*, IEEE Press, San Diego, 851-858.
- Ekama, G.A., Barnard, J.L., Günthert, F.W., Krebs, P., McCorquodale, J.A., Parker, D.S. i Wahlberg, E.J. (1997). *Secondary settling tanks: theory, modelling, design and operation*. IAWQ Scientific and technical report No. 6, IAWQ, London.
- Ekster, A. (2001). Automatic Waste Control. *Proceedings of the 1st IWA Conference on Instrumentation, Control and Automation, ICA'01*, Malmö, Suècia.
- EPA (1992). *Evaluation of Oxidation Ditches for Nutrient Removal*. Environmental Protection Agency. Office of Wastewater Enforcement and Compliance. Washington, D. C. United States.
- Estaben, M., Polit, M. i Steyer, J. P. (1997). Fuzzy control for anaerobic digester. *Control Eng. Pract.*, **5**, 1303-1310.
- F**errer, J., Rodrigo, M. A., Seco, A. i Penya-roja, J.M. (1998). Energy saving in the aeration process by fuzzy logic control. *Water Sci. Technol.*, **38**, 209-217.
- Fiter, M., Rodríguez-Roda, I., Colprim, J. i Poch, M. (2002). Optimización del rendimiento de eliminación del nitrógeno en una EDAR urbana mediante la regulación de la aportación de aire. *Tecnología del Agua*, **230**, 46-50.
- Fiter, M., Colprim, J., Poch, M. i Rodríguez-Roda, I. (2003). Enhancing biological nitrogen removal in a small wastewater treatment plant by regulating the air supply. *Water Sci. Technol.*, **48**(11-12), 445-452.
- Fiter, M., Güell, D., Comas J., Colprim, J., Poch, M. i Rodríguez-Roda, I. (2004). Fuzzy logic control for saving energy in a biological nitrogen removal process. *Frontiers in artificial intelligence and applications*, **113**, IOS Press, Spain, 185-192.
- Fiter, M., Güell, D., Freixó, A., Comas, J., Colprim, J., Poch, M. i Rodríguez-Roda, I. (2005a). Fuzzy Control: gaining ground in the activated sludge process. *Proceedings of the 2nd IWA Conference of Instrumentation, Control and Automation*, Busan (Korea), 1185-1186.
- Fiter, M., Güell, D., Comas J., Colprim, J., Poch, M. i Rodríguez-Roda, I. (2005b). Energy saving in a Wastewater Treatment Process: an Application of Fuzzy Logic. Control. *Environ. Technol.*, **26**, 1263-1270.
- Fiter, M., Güell, D., Comas J., Rodríguez-Roda, I. i Colprim, J. (2005c). Improving reliability of nitrogen removal in sWWTP by fuzzy logic control. *7th IWA Specialty Conference on Small Water and Wastewater Systems, Merida, Mexico, March 7 – 10, 2006* (accepted for oral presentation).
- Flores, X., Bonmatí, A., Poch, M., Banyares-Alcantara, R. i Rodríguez-Roda, I. (2005). Selection of the Activated Sludge Configuration during the Conceptual Design of Activated Sludge Plants. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44**, 3556-3566.
- Fuerhacker, M., Bauer, H., Ellinger, R., Sree, U., Schmid, H., Zibuschka, F. i Puxbaum, H. (2000). Approach for a novel control strategy simultaneous nitrification-denitrification in activated sludge reactors. *Water Res.*, **34**, 2499-2506.
- G**alluzo, M., Ducato, R., Bartolozzi, V. i Picciotto, A. (2001). Expert control of DO in the aerobic reactor of an activated sludge process. *Comput. Chem. Eng.*, **25**, 619-625.

- Genovesi, A., Harmand, J. i Steyer, J. P. (1999). A fuzzy logic based diagnosis system for the on-line supervision of an anaerobic digester pilot-plant. *Biochem. Eng. J.*, **3**, 171-183.
- Gernaey, K.V. i Jorgensen, S.B. (2004). Benchmarking combined biological phosphorus and nitrogen removal wastewater treatment processes. *Control Eng. Pract.*, **12**, 357-373.
- Giles, R. (1976). Lukasiewicz logic and fuzzy set theory. *Int. J. Man Mach. Stud.*, **8**, 313-327.
- Grady, C.P.L. Jr, Daigger, G.T. i Lim, H.C. (1999). *Biological Wastewater Treatment*. 2nd ed. Marcel Dekker, New York.
- H**amacher, H. (1978). Über logische verknüpfungen unscharfer aussagen und deren zugehörige bewertungsfunktionen. In G.J. Klir, R. Trappl and L. Ricciardi (eds.), *Progress in Cybernetics and Systems Research*, Vol.3. Hemisphere, Washington (DC), USA.
- Hamamoto, Y., Tabata, S. i Okubo, Y. (1997). Development of the intermittent cyclic process for simultaneous nitrogen and phosphorus removal. *Water Sci. Technol.*, **35**, 145-152.
- Henze, M., Grady, C.P.L., Gujer, W., Marais, G.V.R., Matsuot, T. (1987). *Activated Sludge Model N^o. 1, IAWPRC Scientific and Technical Report N^o 1*. IAWPRC. Londres.
- Henze, M., P. Harremoës, J. la Cour Jansen i E. Ervin (1995) *Wastewater Treatment – Biological and Chemical Processes*, Springer Verlag, Berlin.
- Heske, T. i Heske, J.N. (1999). *Fuzzy logic for real world design*. 2nd ed. Annabooks, San Diego, Calif.
- Hibiya, K., Terada, A., Tsuneda, S. i Hirata, A. (2003). Simultaneous nitrification and denitrification by controlling vertical and horizontal microenvironment in a membrane-aerated biofilm reactor. *J. Biotechnol.*, **100**, 23-32.
- Holman, J.B. i Wareham, D. G. (2005). COD, ammonia and dissolved oxygen time profiles in the simultaneous nitrification/denitrification process. *Biochem. Eng. J.*, **22**, 125-133.
- Huang, Y. C. i Wang, X. Z. (1999). Application of fuzzy causal networks to waste water treatment plants. *Chem. Eng. Sci.*, **54**, 2731-2738.
- Hydromantis (2003a). GPS-X version 4.1, Hydromantis Inc., Ontario, Canada.
- Hydromantis (2003b). Technical Reference, GPS-X version 4.1, Hydromantis Inc., Ontario, Canada.
- Hydromantis (2003c). Advanced Control Module Manual. Advances Control System Design and Simulation with GPS-X and MATLAB[®]. GPS-X version 4.1, Hydromantis Inc., Ontario, Canada.
- I**ssermann, R. (1998). On fuzzy logic applications for automatic control, supervision, and fault diagnosis. *IEEE T. Syst. Man CY A*, **28**, 221-235.
- J**ager, R. (1995). *Fuzzy Logic in Control*. Tesi doctoral. Universitat Tècnica de Delft, Països Baixos.
- Jenkins, D., Richard, M.G. i Daigger, G.T. (2003). *Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking, Foaming & other Solids Separation Problems*. 3rd ed., Lewis Publishers, Chelsea.
- Jeppsson, U. (1996a) *Modelling Aspects of Wastewater Treatment Plants*. Tesi doctoral, Institute of Technology, Lund.
- Jeppsson, U. i Diehl S. (1996b). On the modeling of the dynamic propagation of biological components in the secondary clarifier. *Water Sci. Technol.* **34**, 85-92.

- Jeppsson, U. I Pons, M-N (2004). The COST benchmark simulation model – current state and future perspective. *Control Eng. Pract.*, **12**, 299-304.
- K**alker, T. J. J., van Goor, C. P., Roeleveld, P. J., Ruland, M. F. i Babuska R. (1999). Fuzzy control of aeration in an activated sludge wastewater treatment plant: design simulation and evaluation. *Water Sci. Technol.*, **39**, 71-78.
- Klir, G. J. i Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic : theory and applications*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Koehne M., Hoen K. i Schuhen M.(1995). Modelling and simulation of final clarifiers in wastewater treatment plants. *Math. Comp. Simulat.*, **39**, 609-616.
- Kosko, B. (1992). *Neural networks and fuzzy systems : a dynamical systems approach to machine intelligence*. Prentice-Hall International, Englewood Cliffs, NJ.
- L**ardon, L., Puñal, A. i Steyer, J. P. (2004). On-line diagnosis and uncertainty management using evidence theory -experimental illustration to anaerobic digestion processes. *J. Process Contr.*, **14**, 747-763.
- Larsen, P.M. (1980). Industrial applications of fuzzy logic control. *Int. J. Man Mach. Stud.*, **12**, 3 - 10.
- Loe, S. (1991). SGS-Thomson launches fuzzy-logic research push. *Electron. World News*, **12**, p.1.
- Lowen, R. (1996). *Fuzzy set theory*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Lynn, P. A. i Fuerst, W. (1998). *Digital signal Processing with Computer Applications*. 2nd ed., John Wiley & Sons, England.
- M**anesis, S. A., Sapidis, D. J. i King, R. E. (1998). Intelligent control of wastewater treatment plants. *Artif. Intell. Eng.*, **12**, 275-281.
- Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for the control of a dynamic plant. *Procc. IEE*, **121**, 1585-1588.
- Mamdani, E.H. i Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int. J. Man Mach. Stud.* **7**,1-13.
- Marsilli-Libelli, S. i Müller, A. (1996). Adaptative fuzzy pattern recognition in the anaerobic digestion process. *Pattern Recogn. Lett.*, **17**, 651-659.
- Marsilli-Libelli, S. i Giunti, L. (2002). Fuzzy predictive control for nitrogen removal in biological wastewater treatment. *Water Sci. Technol.*, **45**, 37-44.
- Martínez, M., Rodríguez-Roda, I., Poch, M., Cortés, C. i Comas, J., (2005). Dynamic reasoning to solve complex problems in activated sludge processes: a step further in Decision Support Systems. *Water Sci. Technol.*, in press.
- Mathworks (2002). Fuzzy logic toolbox for use with MATLAB, version 2. The Mathworks, Inc., Natick, MA.
- Meier, R., Nieuwland, J., Zbinden, A., i Hacidalihzade, S. (1992). Fuzzy logic control of blood pressure during anesthesia. *IEEE Contr. Syst.*, desembre, 12-17.
- Menoud , P., Wong, C. H., Robinson, H. A., Farquhar, A., Barford, J.P. i Barton, G.W. (1999). Simultaneous nitrification and denitrification using Siporaz™ packing. *Water Sci. Technol.*, **40**, 153-160.
- Menzl, S., Stühler, M. i Benz, R. (1996). A self adaptive computer-based pH measurement and fuzzy-control system. *Water Res.*, **30**, 981-991.

- Metcalf & Eddy, Inc (2003). *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. 4th ed., Mc Graw Hill, New York.
- Meyer, U. i Pöpel, H. J. (2003). Fuzzy –control for improved nitrogen removal and energy saving in WWT-plants with pre-denitrification. *Water Sci. Technol.*, **47**, 69-76.
- Molhman, F.W. (1934). The Sludge index. *Sewage Works Journal*, **6**, 119-122.
- Münch, E.V., Lant, P. i Keller, J. (1996). Simultaneous Nitrification and Denitrification in Bench-scale Sequencing Batch Reactors. *Water Res.*, **30**, 277-284.
- Müller, A., Marsilli-Libelli, S., Aivasidis, A., Lloyd, T., Kroner, S. i Wandrey, C. (1997). Fuzzy control of disturbances in a wastewater treatment process. *Water Res.*, **31**, 3157-3167.
- Murnleitner, E., Matthias Becker, T. i Delgado, A.(2002). State detection and control of overloads in the anaerobic wastewater treatment using fuzzy logic. *Water Res.*, **36**, 201-211.
- Olsson G. i Newell, B. (1999). *Wastewater Treatment Systems. Modelling, Diagnosis and Control*. IWA Publishing. London.
- Ottherphol R. i Freund M. (1992). Dynamic models for clarifiers of activated sludge plants with dry and wet weather flows. *Water Sci. Technol.*, **26**, 1391-1400.
- Paraskevas P., Kolokithas G. i Lekkas T. (1993). A complete dynamic model of primary sedimentation. *Environ. Technol.*, **14**, 1037-1046.
- Passino, K.M. i Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. Addison Wesley Longman, Inc., Calif.
- Patry, G.G. i Takács, I. (1992). Settling of flocculent suspensions in secondary clarifiers. *Water Res.* **26**, 473-479.
- Patyra, M. J. i Mylnak, D. M. (1996). *Fuzzy Logic Implementation and Application*, J. Wiley-Teubner, NJ.
- Paul, E., Plisson-Saune, S., Mauret, M. i Cantet, J. (1998). Process state evaluation of alternating oxic-anoxic activated sludge using ORP, pH and DO. *Water Sci. Technol.*, **38**, 299-306.
- Peng, Y. Z., Gao, J. F., Wang, S. Y. i Sui, M. H. (2002). Use pH and ORP as fuzzy control parameters of denitrification in SBR process. *Water Sci. Techno.*, **46**, 131-137.
- Peng, Y.-Z., Gao, J.-F., Wang, S.-Y. i Sui, M.-H. (2003). Use of pH as fuzzy control parameter for nitrification under different alkalinity in SBR process. *Water Sci. Technol.*, **47**, 77-84.
- Poch, M.(1999). *Les qualitats de l'aigua*. A: Monografies del Medi ambient. Departament de Medi Ambient. Barcelona.
- Polit, M., Genovesi, A. i Claudet, B. (2001). Fuzzy logic observers for a biological wastewater treatment process. *Appl. Numer. Math.*, **39**, 173-180.
- Pons, M-N., Spanjers, H. i Jeppsson, U. (1999). Towards a benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plants by simulation. *Proceedings of 9th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, Budapest, Hungria.
- Pons, M-N. i Potier, O. (2004). Control strategy robustness with respect to hydraulics. *Control Eng. Pract.*, **12**, 349-356.
- Puig, S., Corominas, LL, Vives, M.T., Balaguer, M.D., Colprim, J. i Colomer J.(2005). Development and implementation of a real-time control system for nitrogen removal using OUR and ORP as endpoints. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44**, 3367-3373.

- Puñal, A., Palazzotto, L., Bouvier, J. C., Conte, T. i Steyer, J. P. (2003) Automatic control of volatile fatty acids in anaerobic digestion using a fuzzy logic based approach. *Water Sci. Technol.*, **48**, 103-110.
- Puznava, N., Payraudeau, M. i Thornberg, D. (2000). Simultaneous nitrification and denitrification in biofilters with real-time aeration control. *Water. Sci. Technol.*, **43**, 269-271.
- Rammacher, J. i Hansen, J. (2002). Control of nutrient removal based on simple measurement values. *Water Sci. Technol.*, **41**, 29-32.
- Randall, C.W., Barnard, J.L. i Stensel, H.D. (1992). *Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal*. Technomics Publishing, Lancaster, Pennsylvania.
- Ribes, J. (2004). *Modelació de sedimentadors en plantes de tractament d'aigües residuals. Aplicació al procés de fermentació – elutriació de fangs primaris*. Tesi doctoral. Departament d'Enginyeria Química, Universitat de València, València.
- Rittman, B.E. i Langeland, W.E. (1985). Simultaneous Denitrification with Nitrification in Single- Channel Oxidation Ditches. *Water Pollut. Control*, **57**, 300.
- Rodrigo, M. A., Seco, A., Ferrer, J., Peña-Roja, J. M. i Valverde, J. L. (1999). Nonlinear control of an activated sludge process: use of fuzzy techniques for tuning PID controllers. *ISA T.*, **38**, 231-241.
- Ross, T.J. (2004). *Fuzzy logic with engineering applications*. 2nd ed., John Wiley & Sons, England.
- Sazonov, E.S., Klinkhachorn, P., Gangarao, H.V.S. i Halabe, U.B. (2002). Fuzzy Logic Expert System for automated damage detection form changes in strain energy mode shapes. *Non-destruct. Test.*, **18**, 1-20.
- Seborg, D.E., Edgar T.F. i Mellichamp, D.A. (1989). *Process Dynamics and Control*. Wiley, New York.
- Sen, P. i Dentel, S.K. (1998). Simultaneous nitrification-denitrification in a fluidized bed reactor. *Water Sci. Technol.*, **38**, 247-254.
- Shingu, T. i Nishimori, E. (1989). Fuzzy based automatic focusing system for compact camera. *Proceedings of the third international fuzzy systems association congress*, Seattle, WA, 436-439.
- Smith, S.W. (1999). *The scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. 2nd ed., California Technical Publishing, San Diego, California.
- Spanjers, H., Vanrolleghem, P., Nguyen, K., Vanhooren, H. i Patry, G.G. (1998). Towards a simulation-benchmark for evaluating respirometry-based control strategies. *Water Sci. Technol.*, **37**, 219-226.
- Stephanopoulos, G. (1984). *Chemical process control. An introduction to Theory and Practice*. Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, N.J.
- Steyer, J. P., Genovesi, A. i Harmand, J. (2001). Advanced monitoring and control of anaerobic wastewater treatment plants: fault detection and isolation. *Water Sci. Technol.*, **43**, 183-190.
- Stobbe, C.T. (1964). Über das Verhalten des belebten Schlammes in aufsteigender Wasserbewegung. *Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Hochschule Hannover*, vol. 18, Hannover, Germany.
- STOWA (Janssen, P. M. J., Meinema, K. i van der Roest, H. F.) (2002). *Biological Phosphorus Removal: Manual for design and operation*. Water and Wastewater Practitioner Series: STOWA Report. IWA Publishing, London, UK.

- Takács, I., Patry, G. G. i Nolasco, D. (1991). A dynamic model of the clarification-thickening process. *Water Res.*, **25**, 1263-1271.
- Takagi, H. (1992). Survey: Fuzzy logic applications to image processing equipment en J. Yen, R. Langari, i L. Zadeh (eds.), *Proc. of the second international workshop – industrial fuzzy control and intelligent systems*, IEEE Press, College Station, TX, 1-9.
- Takagi, H. i Sugeno, M. (1983). Derivation of fuzzy control rules from human operator's control actions. *Proc. IFAC Sym. Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis*, Marseille, France, 55-60.
- Tay, J-H. i Zhang, X. (2002). A fast predicting neural fuzzy model for high rate anaerobic wastewater treatment systems. *Water Res.*, **34**, 2849-2860.
- Tomiello, M., Perrin, E., Roubens, M. i Crine, M. (1999). Fuzzy control of an activated sludge process. *ECCE 2- 2nd European Congreso of Chemical Enginnering*, Montpellier, France.
- Traore, A. (2003). *Logique floue et controle supervise des procedes biologiques de depollution*. Tesi doctoral. Universitat de Montpellier II, França.
- Trivedi, H. i Heinen, N. (2000). Simultaneous Nitrification/Denitrification by Monitoring NAOH Fluorescence in Activated Sludge. *Proceedings of the Facility Operations II: Innovate Technology Forum; 73 ed Annual Conference*, Water Environment Federation, Anaheim, CA.
- Tsai, Y. P., Ouyang, C. F., Wu, M. Y. i Chiang, W. L. (1993). Fuzzy control of dynamic activated sludge process for the forecast and control of effluent suspended solid concentration. *Water Sci. Technol.*, **28**, 355-367.
- Tsai, Y. P., Ouyang, C. F., Chiang, W. L. i Wu, M. Y. (1994). Construction of an on-line fuzzy controller for the dynamic activated sludge process. *Water Res.*, **28**, 913-921.
- Tsai, Y.P., Ouyang, C.F., Wung, M.Y. and Chiang, W.L. (1996). Effluent suspended solid control of activated sludge process by fuzzy control approach. *Water Environ. Res.*, **68**, 1045-1053.
- Van Huyssteen, J.A., Barnard, J.L. i Hendriksz, J. (1990). The Olifantsfontein nutrient removal plant. *Water Sci. Technol.*, **22**, 1-8.
- Vanrolleghem, P.A. i Gilliot, S. (2002). Robustness and economic measures as control benchmark performance criteria. *Water Sci. Technol.*, **45** (4-5), 117-126.
- Vrecko, D., Hvala, N. i Kocijan, J. (2002). Wastewater treatment benchmark: what can be achieved with simple control? *Water Sci. Technol.*, **45**(4-5), 127-134.
- Wang, L-X, (1994). *Adaptive fuzzy systems and control*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Wang, L-X. (1997). *A course in fuzzy systems and control*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Wanner, J. (1994). *Activated sludge bulking and foaming control*. Technomic Publishing Co., Lancaster, PA.
- Watanabe, T., Hashimoto, S. i Kuroda, M.(2002). Simultaneous nitrification and denitrification in a single reactor using bioelectrochemical process. *Water Sci. Technol.*, **46**, 163-169.
- Weber (1983). A general concept of fuzzy connectives, negations and implications based on t-norms and t-co-norms. *Fuzzy Set. Syst.*, **11**, 115-134.
- WEF (1996). *Operation of municipal wastewater treatment plants*. 5th ed., Manual of Practice No.11, vol. 2, Water Environment Federation, Alexandria, VA.

WEF (1998). *Design of Wastewater Treatment Plants*. 4th ed., Manual of Practice No.8, Water Environment Federation, Alexandria, VA.

Wen, C-G. i Lee, C-S. (1999). Development of a cost function for wastewater treatment systems with fuzzy regression. *Fuzzy Set. Syst.*, **106**, 143-153.

White, M.J.D. (1976). Design and control of secondary settling tanks. *Water Pollut. Control*, **75**, 459-467.

Yager, R.R. (1980). On a general class of fuzzy connectives. *Fuzzy Set. Syst.*, **4**, 235-242.

Yoo, C. Y., Vanrolleghem, P. A., i Lee, I-B. (2003). Nonlinear modeling and adaptive monitoring with fuzzy and multivariable statistical methods in biological wastewater treatment plants. *Journal Biotechno.*, **105**, 135-163.

Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Inform. Control* **8**, 338-353.

Zadeh, L.A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE T. Syst. Man Cy, C*, **3**, 28-44.

Zadeh, L.A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning (parts I and II). *Inform. Sciences*, **8**, 199 -249, 301-357.

Zamarreño, J. M. i Vega, P. (1999). Neural predictive control. Application to a highly non-linear system. *Eng. Appl. Artif. Intel.*, **12**, 149-158.

Zarrad, W., Harmand, J., Devisscher, M. i Steyer, J.P. (2004). Comparison of advanced control strategies for improving the monitoring of activated sludge processes. *Control Eng. Pract.*, **12**, 323-333.

ANNEXES



ANNEX 1. Fitxers d'enllaç entre MATLAB i GPS-X

A continuació es presenten els fitxers utilitzats per l'estudi de simulació dels SCLD_SS i SCLD_N.

SCLD_SS

En la figura A.1 es presenta el fitxer 'grano05.mtl' on s'especifiquen les variables d'entrada i de sortida de MATLAB.

```
!
! grano05.mtl - matlab link setup file
!
MFILE grano05          ! mfile is grano05.m
BEGIN_MATLABINPUTS
sviQoutDS1
qconent
sviQoutDS2
END_MATLABINPUTS
BEGIN_MATLABOUTPUTS
qconQras1
qconQras2
END_MATLABOUTPUTS
INITCOMMAND clear functions; cd d:/'Mireia_GPS-X'/GRANOLLERS_Tesi_GPS-X
```

Figura A.1. Fitxer grano05.mtl on s'especifiquen les variables d'entrada i sortida de MATLAB per la simulació del SCLD_SS.

El vector d'entrada al programa MATLAB, són les variables IVF dels decantadors secundaris (*sviQout DS1*; *sviQoutDS2*) i el cabal d'entrada (*qconent*) del GPS-X. En el vector de sortida de MATLAB hi han els cabals de recirculació dels decantadors secundaris (*qconQras1*; *qconQras2*), que són enviats al GPS-X, després d'haver-se executat el fitxer de MATLAB amb extensió .m (figura A.2) on es troba definit el SCLD_SS.

El fitxer 'grano05.m' que es presenta en la figura A.2, carrega el fitxer 'SCLD_SS.fis' definit per la 'Fuzzy Logic Toolbox' de MATLAB mitjançant l'ordre '*readfis*'. Un cop llegit els valors de les variables d'IVF i cabal d'entrada del GPS-X, s'executa el SCLD_SS a través de l'ordre '*evalfis*' i s'obté un percentatge de recirculació que és multiplicat pel màxim cabal de recirculació fixat per cada decantador secundari ($7200 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$). Per acabar, abans d'enviar els cabals de recirculació cap al GPS-X, es limita el mínim de cabal que cada decantador secundari pot recircular ($4800 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$).

```

function [outputs] = grano05 (t, inputs)

%Carrega el sistema de control basat en lògica difusa
cd d:\'Mireia_GPS-X'\GRANOLLERS_Tesi_GPS-X;
a=readfis('SCLD_SSI_línia1');
b=readfis('SCLD_SSI_línia2');

% Map input vector to GPS-X names
sviQoutDS1 = inputs(1);
qconent = inputs(2);
sviQoutDS2 = inputs(3);

if isstr(t)
    % GPS-X initialization phase,
    qconQras1 = 7200;
    qconQras2 = 7200;
else
    % Calcula el cabal de recirculació necessari mitjançant el SCLD_SS
    ras1 = evalfis([sviQoutDS1,qconent],a);
    qconQras1=(ras1*14400);
    ras2 = evalfis([sviQoutDS2,qconent],b);
    qconQras2=(ras2*14400);
end
% Introdueix seguretat de cabal de recirculació mínim
if qconQras1 < 4800;
    qconQras1 = 4800;
end
if qconQras2 < 4800;
    qconQras2 = 4800;
end

% Map GPS-X names to output vector
outputs(1) = qconQras1;
outputs(2) = qconQras2;

return;

```

Figura A.2. Fitxer grano05.m de MATLAB a través del qual s'executa el SCLD_SS a simular.

SCLD_N

En la figura A.3 es presenta el fitxer 'taradell.mtl' on s'especifiquen les variables d'entrada i de sortida de MATLAB.

El vector d'entrada al programa MATLAB, són les variables d'oxigen dissolt i nitrats dels reactors (*solinsettlerL1* i *snolinsettlerL1* per la línia 1; *solinsettlerL2* i *snolinsettlerL2* per la línia 2) i l'aeració en forma de K_{La} en un instant t (*klaconinsettlerL1*, *klacon9(1)* i *klacon9(2)* per la línia 1; *klaconinsettlerL2*, *klacon46(1)* i *klacon46(2)* per la línia 2) del GPS-X. En el vector de sortida de MATLAB hi ha l'aeració en forma de K_{La} en un instant $t+1$, que és enviada al GPS-X, després d'haver-se executat el fitxer de MATLAB amb extensió .m (figura A.4) on es troba definit el SCLD_N.

```

!
! taradell.mtl - matlab link setup file
!
MFILE taradell          ! mfile is taradell.m

BEGIN_MATLABINPUTS
solinsettlerL1
snolinsettlerL1
klaconinsettlerL1
klacon9(1)
klacon9(2)
solinsettlerL2
snolinsettlerL2
klaconinsettlerL1
klacon46(1)
klacon46(2)
END_MATLABINPUTS

BEGIN_MATLABOUTPUTS
klaconinsettlerL1
klacon9(1)
klacon9(2)
klaconinsettlerL2
klacon46(1)
klacon46(2)
END_MATLABOUTPUTS

INITCOMMAND clear functions; cd d:/Mireia_GPS-X/Taradell_GPS-X_TESI

```

Figura A.3. Fitxer amb taradell.mtl on s'especifiquen les variables d'entrada i sortida de MATLAB per la simulació del SCLD_N.

El fitxer 'taradell.m' que es presenta en la figura A.4, carrega el fitxer 'SCLD_N.fis' definit en la 'Fuzzy Logic Toolbox' de Matlab mitjançant l'ordre '*readfis*'. Un cop llegit els valors de les variables d'oxigen dissolt, nitrats i aeració del GPS-X, s'executa el SCLD_N a través de l'ordre '*evalfis*' i s'obté un increment de l'aeració (*factorL1* per la línia 1 i *factorL2* per la línia 2) que és multiplicat al valor de l'aeració llegit anteriorment. Per acabar, s'envia la nova aeració en forma de K_{La} per les dues línies al GPS-X.


```
function [outputs] = taradell(t, inputs)

%Carregar sistema de control basat en lògica difusa
cd d:\Mireia_GPS-X\Taradell_GPS-X_TESI;
a=readfis('SCLD_N1_linia1');
b=readfis('SCLD_N1_linia2');

% Map input vector to GPS-X names
odL1 = inputs(1)
snoL1 = inputs(2)
klaL1= inputs(3)
kla9_1 = inputs(4)
kla9_2 = inputs(5)
odL2 = inputs(6)
snoL2 = inputs(7)
klaL2 = inputs(8);
kla46_1 = inputs(9);
kla46_2 = inputs(10);

if isstr(t)
    % GPS-X initialization phase,
    klaconL1_3 = 140;
    klacon9_1 = 140;
    klacon9_2 = 140;
    klaconL2_3 = 140;
    klacon46_1 = 140;
    klacon46_2 = 140;
else
    % Calcula l'aeració necessària mitjançant el SCLD_N
    factorL1 = evalfis([odL1 snoL1],a);
    klaconL1 = factorL1*klaL1_3;
    klacon9_1 = factorL1*kla9_1;
    klacon9_2 = factorL1*kla9_2;
    factorL2 = evalfis([odL2 snoL2],b);
    klaconL2 = factorL2*klaL2_3;
    klacon46_1 = factorL2*kla46_1;
    klacon46_2 = factorL2*kla46_2;
end

% Map GPS-X names to output vector
outputs(1) = klaconL1
outputs(2) = klacon9_1
outputs(3) = klacon9_2
outputs(4) = klaconL2
outputs(5) = klacon46_1
outputs(6) = klacon46_2

return;
```

Figura A.4. Fitxer taradell.m de MATLAB a través del qual s'executa el SCLD_N a simular.

ANNEX 2. Codis dels programes informàtics per la implementació dels SCLD.

A continuació es presenten els codis dels programes informàtics utilitzats per la implementació del SCLD_SS i el SCLD_N.

SCLD_SS

El programa informàtic del SCLD_SS va ser anomenat "Recirauto" i es va desenvolupar amb el llenguatge de programació Java ®, tal i com es s'exposa a continuació:

```

/**
 * <p>Título: Integració mòdul Fuzzy Matlab a ATL EDAR MIDI - Projecte Mireia</p>
 * <p>Descripción: Adaptació del mòdul Fuzzy Matlab del projecte de la Mireia</p>
 * <p>Copyright: Copyright (c) 2004-2005</p>
 * @author: Toni Tena Pérez
 * @version 1.0 built 04.04.05
 */
package fuzzy;

import nrc.fuzzy.*;
import controlDades.*;

public class Recirauto {

// -----
// Declaració de Regles Fuzzy
// -----
    FuzzyRule baixIvfBaixQen;           // Regla 1 - Antecedents: Ivf Baix - Qen Baix
    FuzzyRule baixIvfNormalQen;        // Regla 2 - Antecedents: Ivf Baix - Qen Normal
    FuzzyRule baixIvfAltQen;           // Regla 3 - Antecedents: Ivf Baix - Qen Alt
    FuzzyRule normalIvfBaixQen;        // Regla 4 - Antecedents: Ivf Normal - Qen Baix
    FuzzyRule normalIvfNormalQen;      // Regla 5 - Antecedents: Ivf Normal - Qen Normal
    FuzzyRule normalIvfAltQen;         // Regla 6 - Antecedents: Ivf Normal - Qen Alt
    FuzzyRule altIvfBaixQen;           // Regla 7 - Antecedents: Ivf Alt - Qen Baix
    FuzzyRule altIvfNormalQen;         // Regla 8 - Antecedents: Ivf Alt - Qen Normal
    FuzzyRule altIvfAltQen;           // Regla 9 - Antecedents: Ivf Alt - Qen Alt

// -----
// Declaració de variables Fuzzy
// -----
// Inputs
    FuzzyVariable ivf;
    FuzzyVariable Qen;

// Output
    FuzzyVariable Qrec;

    FuzzyValueVector fvv;
    FuzzyValue globalOutput;

    public static double OutputCrispValue = 0;

    public Recirauto(double Qfiltrat,double ivf1)
    {

// definició de les regles i variables Fuzzy que s'utilitzaran
        baixIvfBaixQen = new FuzzyRule();
        baixIvfNormalQen = new FuzzyRule();
        baixIvfAltQen = new FuzzyRule();
        normalIvfBaixQen = new FuzzyRule();
        normalIvfNormalQen = new FuzzyRule();
        normalIvfAltQen = new FuzzyRule();
        altIvfBaixQen = new FuzzyRule();
        altIvfNormalQen = new FuzzyRule();
        altIvfAltQen = new FuzzyRule();

```

```

try {
// definició de la variable d'entrada Ivf amb els seus termes

// 0 - 250
Ivf=new
FuzzyVariable("IVF",Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("IvfBaixvalor_1").toString()),Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("IvfAltvalor_4").toString()), "ml/g");

ivf.addTerm("baix",newRightLinearFuzzySet(Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("IvfBaixvalor_3").toString()), Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Ivf Baixvalor_4").toString())));

ivf.addTerm("normal",newTrapezoidFuzzySet
(Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("IvfNormalvalor_1").toString()),
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Ivf Normalvalor_2").toString()),
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Ivf Normalvalor_3").toString()),
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Ivf Normalvalor_4").toString())));

ivf.addTerm("alt",newLeftLinearFuzzySet(Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("IvfAltvalor_1").toString()), Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Ivf Altvalor_2").toString())));

// definició de la variable d'entrada Qen amb els seus termes
// 300 - 1450
Qen=newFuzzyVariable("Qen",
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("QenBaixvalor_1").toString()),Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("QenAltvalor_4").toString()), m3/hora);

Qen.addTerm("baix", new RightLinearFuzzySet
(Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("QenBaixvalor_3").toString()),
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Qen Baixvalor_4").toString())));

Qen.addTerm("normal",newTrapezoidFuzzySet
(Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Qen Normalvalor_1").toString()),
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Qen Normalvalor_2").toString()),
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Qen Normalvalor_3").toString()),
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Qen Normalvalor_4").toString())));

Qen.addTerm("alt",newLeftLinearFuzzySet
(Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Qen Altvalor_1").toString()),
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Qen Altvalor_2").toString())));

// definició de la variable de sortida Qrec amb els seus termes
// 0 - 100
Qrec=newFuzzyVariable("Qrec",
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("QrecBaixvalor_1").toString()),Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("QrecAltvalor_4").toString()), "m3/hora");

Qrec.addTerm("baix", new RightLinearFuzzySet
(Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("QrecBaixvalor_3").toString()),
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("QrecBaixvalor_4").toString())));

Qrec.addTerm("normal", new TrapezoidFuzzySet
(Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Qrec Normalvalor_1").toString()),
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Qrec Normalvalor_2").toString()),
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Qrec Normalvalor_3").toString()),
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Qrec Normalvalor_4").toString())));

Qrec.addTerm("alt", new LeftLinearFuzzySet
(Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Qrec Altvalor_1").toString()),
Integer.parseInt(ControlDades.fuzzy.get("Qrec Altvalor_2").toString())));

// Regla 1
// Antecedents and conclusió
baixIvfBaixQen.addAntecedent(new FuzzyValue(ivf,"baix"));
baixIvfBaixQen.addAntecedent(new FuzzyValue(Qen,"baix"));
baixIvfBaixQen.addConclusion(new
FuzzyValue(Qrec,ControlDades.fuzzy.get("1valor_1").toString()));
//baixIvfBaixQen.addConclusion(new FuzzyValue(Qrec,"alt"));

// Regla 2
// Antecedents and conclusió
baixIvfNormalQen.addAntecedent(new FuzzyValue(ivf,"baix"));
baixIvfNormalQen.addAntecedent(new FuzzyValue(Qen,"normal"));
baixIvfNormalQen.addConclusion(new
FuzzyValue(Qrec,ControlDades.fuzzy.get("2valor_1").toString()));

```

```

//baixIvfNormalQen.addConclusion(new FuzzyValue(Qrec,"alt"));

// Regla 3
// Antecedents and conclusió
baixIvfAltQen.addAntecedent(new FuzzyValue(ivf,"baix"));
baixIvfAltQen.addAntecedent(new FuzzyValue(Qen,"alt"));
baixIvfAltQen.addConclusion(new
FuzzyValue(Qrec,ControlDades.fuzzy.get("3valor_1").toString()));

// Regla 4
// Antecedents and conclusió
normalIvfBaixQen.addAntecedent(new FuzzyValue(ivf,"normal"));
normalIvfBaixQen.addAntecedent(new FuzzyValue(Qen,"baix"));
normalIvfBaixQen.addConclusion(new
FuzzyValue(Qrec,ControlDades.fuzzy.get("4valor_1").toString()));
//normalIvfBaixQen.addConclusion(new FuzzyValue(Qrec,"alt"));

// Regla 5
// Antecedents and conclusió
normalIvfNormalQen.addAntecedent(new FuzzyValue(ivf,"normal"));
normalIvfNormalQen.addAntecedent(new FuzzyValue(Qen,"normal"));
normalIvfNormalQen.addConclusion(new
FuzzyValue(Qrec,ControlDades.fuzzy.get("5valor_1").toString()));

// Regla 6
// Antecedents and conclusió
normalIvfAltQen.addAntecedent(new FuzzyValue(ivf,"normal"));
normalIvfAltQen.addAntecedent(new FuzzyValue(Qen,"alt"));
//normalIvfAltQen.addConclusion(new FuzzyValue(Qrec,"baix"));
normalIvfAltQen.addConclusion(new
FuzzyValue(Qrec,ControlDades.fuzzy.get("6valor_1").toString()));

// Regla 7
// Antecedents and conclusió
altIvfBaixQen.addAntecedent(new FuzzyValue(ivf,"alt"));
altIvfBaixQen.addAntecedent(new FuzzyValue(Qen,"baix"));
altIvfBaixQen.addConclusion(new
FuzzyValue(Qrec,ControlDades.fuzzy.get("7valor_1").toString()));

// Regla 8
// Antecedents and conclusió
altIvfNormalQen.addAntecedent(new FuzzyValue(ivf,"alt"));
altIvfNormalQen.addAntecedent(new FuzzyValue(Qen,"normal"));
//altIvfNormalQen.addConclusion(new FuzzyValue(Qrec,"alt"));
altIvfNormalQen.addConclusion(new
FuzzyValue(Qrec,ControlDades.fuzzy.get("8valor_1").toString()));

// Regla 9
// Antecedents and conclusió
altIvfAltQen.addAntecedent(new FuzzyValue(ivf,"alt"));
altIvfAltQen.addAntecedent(new FuzzyValue(Qen,"alt"));
//altIvfAltQen.addConclusion(new FuzzyValue(Qrec,"alt"));
altIvfAltQen.addConclusion(new
FuzzyValue(Qrec,ControlDades.fuzzy.get("9valor_1").toString()));
// Llança les regles per les variables d'entrada fuzzy Ivf i Qen
double ivfCrisp = ivf1;
double QenCrisp = Qfiltrat;

try
{
globalOutput = null; // global contribution of outputs of each rule

// Fuzzificació dels valors d'entrada (crisp inputs) en valors Fuzzy

//FuzzyValue ivfFv = new FuzzyValue(this.ivf,new TriangleFuzzySet(ivfCrisp, 4.5));
// 0.5 //FuzzyValue QenFv = new FuzzyValue(this.Qen,new TriangleFuzzySet(QenCrisp, 4.5));
// 0.5
FuzzyValue ivfFv = new FuzzyValue(this.ivf, new TriangleFuzzySet(ivfCrisp-
0.05,ivfCrisp,ivfCrisp+0.05));
FuzzyValue QenFv = new FuzzyValue(this.Qen, new TriangleFuzzySet(QenCrisp-
0.05,QenCrisp,QenCrisp+0.05));
FuzzyValue fv;

```

```
// Afegir inputs a les regles i executar-les
// Note: S'utilitza testRuleMatching abans per comprovar si realment la regla es necessita
executar
```

```
// REGLA 1
this.baixIvfBaixQen.removeAllInputs(); // Borrar entrades prèvies si hi ha
this.baixIvfBaixQen.addInput(ivfFv);
this.baixIvfBaixQen.addInput(QenFv);

if (this.baixIvfBaixQen.testRuleMatching())
{
    fvv = baixIvfBaixQen.execute(); // Obtenir sortida de la regla
    globalOutput = fvv.fuzzyValueAt(0); // Primera regla ... sortida global
}

// REGLA 2
this.baixIvfNormalQen.removeAllInputs();
this.baixIvfNormalQen.addInput(ivfFv);
this.baixIvfNormalQen.addInput(QenFv);

if (this.baixIvfNormalQen.testRuleMatching())
{
    fvv = baixIvfNormalQen.execute(); // Obtenir sortida de la regla
    fv = fvv.fuzzyValueAt(0); // no és la primera regla per tant,
    // s'afegeix a la posició següent del vector

    if (globalOutput == null) // Sortida global
        globalOutput = fv;
    else
        globalOutput = globalOutput.fuzzyUnion(fv);
}

// REGLA 3
this.baixIvfAltQen.removeAllInputs();
this.baixIvfAltQen.addInput(ivfFv);
this.baixIvfAltQen.addInput(QenFv);

if (this.baixIvfAltQen.testRuleMatching())
{
    fvv = baixIvfAltQen.execute();
    fv = fvv.fuzzyValueAt(0);

    if (globalOutput == null)
        globalOutput = fv;
    else
        globalOutput = globalOutput.fuzzyUnion(fv);
}

// REGLA 4
this.normalIvfBaixQen.removeAllInputs();
this.normalIvfBaixQen.addInput(ivfFv);
this.normalIvfBaixQen.addInput(QenFv);

if (this.normalIvfBaixQen.testRuleMatching())
{
    fvv = normalIvfBaixQen.execute();
    fv = fvv.fuzzyValueAt(0);

    if (globalOutput == null)
        globalOutput = fv;
    else
        globalOutput = globalOutput.fuzzyUnion(fv);
}

// REGLA 5
this.normalIvfNormalQen.removeAllInputs();
this.normalIvfNormalQen.addInput(ivfFv);
this.normalIvfNormalQen.addInput(QenFv);
```

```
if (this.normalIvfNormalQen.testRuleMatching())
{
    fvv = normalIvfNormalQen.execute();
    fv = fvv.fuzzyValueAt(0);

    if (globalOutput == null)
        globalOutput = fv;
    else
        globalOutput = globalOutput.fuzzyUnion(fv);
}

// REGLA 6
this.normalIvfAltQen.removeAllInputs();
this.normalIvfAltQen.addInput(ivfFv);
this.normalIvfAltQen.addInput(QenFv);

if (this.normalIvfAltQen.testRuleMatching())
{

    fvv = normalIvfAltQen.execute();
    fv = fvv.fuzzyValueAt(0);

    if (globalOutput == null)
        globalOutput = fv;
    else
        globalOutput = globalOutput.fuzzyUnion(fv);
}

// REGLA 7
this.altIvfBaixQen.removeAllInputs();
this.altIvfBaixQen.addInput(ivfFv);
this.altIvfBaixQen.addInput(QenFv);

if (this.altIvfBaixQen.testRuleMatching())
{

    fvv = altIvfBaixQen.execute();
    fv = fvv.fuzzyValueAt(0);

    if (globalOutput == null)
        globalOutput = fv;
    else
        globalOutput = globalOutput.fuzzyUnion(fv);
}

// REGLA 8
this.altIvfNormalQen.removeAllInputs();
this.altIvfNormalQen.addInput(ivfFv);
this.altIvfNormalQen.addInput(QenFv);

if (this.altIvfNormalQen.testRuleMatching())
{

    fvv = altIvfNormalQen.execute();
    fv = fvv.fuzzyValueAt(0);

    if (globalOutput == null)
        globalOutput = fv;
    else
        globalOutput = globalOutput.fuzzyUnion(fv);
}

// REGLA 9
```

```

this.altIvfAltQen.removeAllInputs();
this.altIvfAltQen.addInput(ivfFv);
this.altIvfAltQen.addInput(QenFv);

if (this.altIvfAltQen.testRuleMatching())
{

    fvv = altIvfAltQen.execute();
    fv = fvv.fuzzyValueAt(0);
    if (globalOutput == null)
        globalOutput = fv;
    else
        globalOutput = globalOutput.fuzzyUnion(fv);

}

// defuzzificació de la sortida global (global) per obtenir el valor de
sortida (crisp value)
OutputCrispValue = globalOutput.momentDefuzzify();
System.runFinalization();
System.gc();
}

catch (FuzzyException e)

{
    System.out.println(e);
    e.printStackTrace();
    System.out.println("At .../n"+ globalOutput);
}

}

catch (FuzzyException e)

{
    e.printStackTrace();
    System.out.println(e);
    System.out.println(e.getMessage());
}

}

} // End Main

```

SCLD_N

El programa informàtic del SCLD_N va ser anomenat "Control fuzzy reactor N/D Taradell" i es va desenvolupar amb el llenguatge de programació ObjectPascal (Borland® Delphi®), tal i com es presenta a continuació.

Main.PAS es refereix al codi font principal amb ObjectPascal utilitzat per desenvolupar l'aplicació pel SCLD_N. SCLD_N. FIS és l'arxiu de MATLAB del Fuzzy Logic Toolbox a partir del qual es defineixen els components (funcions de pertinença i regles 'Si-Llavors') del SCLD_N.

Main.PAS

```

unit main;

MainMenu1: TMainMenu;
Opciones1: TMenuItem;
Seguretat1: TMenuItem;
private
{ Private declarations }
IconData : TNotifyIconData;
inici:boolean;

control_temps: integer;

HourF, MinF, SecF, MSecF: Word;
directori,sFullAppPath,fitxer:string;
comanda: string;
PosX,PosY:integer;
Numentrades,Numsortides:integer;
Conout,Sortida_Control:string;
Sortida_control_temp: double;
Sortida_control_old:string;
Error:integer;
Conout2,Sortida_Control2:string;
Sortida_control2_temp: double;
Sortida_control_old2:string;
Error2:integer;

RangSortides,minim,maxim:real;

fontx,fonty,defaultfont:tfont;
xmintr,ymintr,xmaxtr,ymaxtr: double;
xMinH, xMaxH, YminH, yMaxH : double;
X,Y,Xant,Yant:double;
X2,Y2,Xant2,Yant2:double;
fisfile: string;

procedure ProcesaFitexrFIS(Fitxer:string; var NumEntrades, Numsortides:integer;var
RangSortides,minim,maxim:real);
Procedure FormatGrid;
Function ReturnFutureTime(CurrentTime : TDateTime; Seconds : Integer) : TDateTime;
procedure WMSysCommand(var Msg: TWMSysCommand); message WM_SYSCOMMAND;
procedure Espabila(var Msg : TMessage); message WM_USER+1;

public
{ Public declarations }
TempsExecucio:integer;
Tredox_R1,RedOxi_R1,RedoxFiltrat_R1,TOD_R1,ODi_R1,ODFiltrat_R1: double;
Tredox_R2,RedOxi_R2,RedoxFiltrat_R2,TOD_R2,ODi_R2,ODFiltrat_R2: double;
DATATredox_R1,DATARedOxi_R1,DATARedoxFiltrat_R1,DATATOD_R1,DATAODi_R1,DATAODFiltrat_R1:
TdataArray;
DATATredox_R2,DATARedOxi_R2,DATARedoxFiltrat_R2,DATATOD_R2,DATAODi_R2,DATAODFiltrat_R2:
TdataArray;
RPML1,RPML2,RPML1_old,RPML2_old:Double;
fuzzy_1,fuzzy2_1:double;
Iteracions1,Iteracions2:integer;
Biol_OK, Bio2_OK: boolean;
contador_errores_biol, contador_errores_bio2: integer;

Tredox_R1_old,RedOxi_R1_old,RedoxFiltrat_R1_old,TOD_R1_old,ODi_R1_old,ODFiltrat_R1_old:
double;
Tredox_R2_old,RedOxi_R2_old,RedoxFiltrat_R2_old,TOD_R2_old,ODi_R2_old,ODFiltrat_R2_old:
double;
STredox_R1,SRedOxi_R1,SRedoxFiltrat_R1,STOD_R1,SODi_R1,SODFiltrat_R1: string;
STredox_R2,SRedOxi_R2,SRedoxFiltrat_R2,STOD_R2,SODi_R2,SODFiltrat_R2: string;

MatriuValorsOD1 : array[1..6] of Real;
MatriuValorsOD2 : array[1..6] of Real;
MatriuValorsRD1 : array[1..6] of Real;
MatriuValorsRD2 : array[1..6] of Real;
MINIMES_RPM: DOUBLE;

HoraFutura:Tdatetime;
end;
const
MargeEsquerra=0.07;

```



```

margeDret=0.93;
MargeSup=0.90;
MargeInf=0.10;
MargeinfTPC=0.50;

```

```

var
  Form1: TForm1;

```

implementation

```

.....

```

```

procedure TForm1.FormatGrid;
begin
  end;
procedure TForm1.ProcesaFitexrFIS(Fitxer:string; var NumEntrades, Numsortides:integer;var
RangSortides,minim,maxim:real);
var
  f : textfile;
  i,j,k:integer;
  Buffer,lectura:string;
  area:integer; //0 : system, 1: input1... -1: no ha llegit res!!
  subarea:integer;// 0: Numinputs 1:NumOutputs .. la resta en funcio del numero IN/OUT
  compara:char;
  NIN,NOUT:integer;
  Rangeout: array[1..2] of double;
  LabelMatrix: array of string;
  ValueMatrix: array of string;
  r1,r2,mitja:real;
begin
  area:=0;
  subarea:=-1;
  k:=1;
  NIN:=0;
  NOUT:=0;
  assignfile(F,fitxer);
  try
  Reset(F);
  ReadLn(F,buffer);
  finally
  closefile(F);
  end;
  lectura:='';

  for i:=1 to length(Buffer) do
  begin
    if (buffer[i]<> #10) and (buffer[i]<> '=') then
    begin
      if buffer[i]<>' ' then lectura:=lectura+buffer[i];
    end
    else
    begin
      if area =0 then
      begin
        if subarea=0 then
        begin
          NIN:=strtoint(lectura);
          subarea:=-1;
        end
        else
        if subarea=1 then
        begin
          NOUT:=strtoint(lectura);
          subarea:=-1;
          If (NIN > 0) and (NOUT> 0) then
          begin
            setlength(labelMatrix,NIN+NOUT+1);
            setlength(ValueMatrix,NIN+NOUT+1);
            for j:=1 to NIN+NOUT do
            begin
              if j<=NIN then
              begin
                labelmatrix[j]:='[Input'+inttostr(j)+']';
              end
              else
              begin

```

```

        labelmatrix[j]:='[Output'+inttostr((j-NIN))+']';
        area:=1;
    end;
end;
end
else
begin
    MessageDlg('Error al processar el fitxer .FIS', mtError, [mbOK], 0);
end;
// aqui es pot redimensionar la matriu de inputs i outputs
end;

if lectura = 'NumInputs' then
begin
    subarea:=0;
end
else
if lectura = 'NumOutputs' then
begin
    subarea:=1
end;
end
else
if (area=1)then
begin
    if subarea=2 then
begin
    ValueMatrix[k]:=lectura;
    subarea:=0;
    //showmessage(lectura);
    inc(k);
end

else
if subarea=1 then
begin
    if lectura = 'Name' then
begin
        subarea:=2;
end;
end
else
begin
    if (k <= (NIN+NOUT)) then
begin
    if lectura = LabelMatrix[k] then
begin
        //showmessage(lectura);
        subarea:=1;
        //inc(k);
end;
end;
end;
end;
lectura:='';
end;
end;
//reactor 1
form1.StringGrid1.ColCount:= NIN+NOUT+3;
Form1.StringGrid1.RowCount:=1500;
form1.StringGrid1.Cells[0,0]='Data';
Form1.StringGrid1.Cells[1,0]='Hora';
for j:=1 to NIN+NOUT do
begin
    //showmessage(valuematrix[1]);
    form1.StringGrid1.Cells[j+1,0]:=valuematrix[j]
end;
form1.StringGrid1.Cells[NIN+NOUT+2,0]='RPM reals';
// Ampliació reactor 2

form1.StringGrid2.ColCount:= NIN+NOUT+3;
Form1.StringGrid2.RowCount:=1500;
form1.StringGrid2.Cells[0,0]='Data';
Form1.StringGrid2.Cells[1,0]='Hora';
for j:=1 to NIN+NOUT do
begin
    //showmessage(valuematrix[1]);

```

```

    form1.StringGrid2.Cells[j+1,0]:=valuematrix[j]
end;
form1.StringGrid2.Cells[NIN+NOOUT+2,0]:='RPM reals';

//-----
Numentrades:=NIN;
NumSortides:=NOOUT;

// parche per poder saber el rang de sortida
for i:=1 to length(Buffer) do
begin
if (buffer[i]<> #10) and (buffer[i]<> '=') then
begin
if buffer[i]<>' ' then lectura:=lectura+buffer[i];
end
else
begin
//showmessage(lectura);
if lectura='[Output1]' then
begin

lectura:='';
j:=i;
while j<length(buffer)do
begin
if (buffer[j]<> #10) and (buffer[j]<> '=') then
begin
if (buffer[j]<>' ') AND (buffer[j]<>'') then lectura:=lectura+buffer[j];
if buffer[j]='[' then lectura:='';
if buffer[j]=' ' then
begin
corregircoma(lectura);
r1:=strtofloat(lectura);

//showmessage(lectura);
lectura:='';
end;
if buffer[j]='']' then
begin
corregircoma(lectura);
r2:=strtofloat(lectura);
lectura:='';
j:=length(buffer)+1;
end;

end;
inc(j);
end;

end;
lectura:='';
end;
end;
rangsortides:=(r2-r1)/2;
minim:=r1*740;
maxim:=r2*740;
end;
Procedure Procesar_Sortida_control(Conout:string;rangsortides:real; var Error: integer; var
Sortida_Control: string);
var
i,L,J :integer;
Buffer,BufferPlus,Buffer_old:string;
isnumber,readingnumber,waitingoutput:boolean;
begin
L:=length(conout);
i:=1;
Buffer:='';
BufferPlus:='';
waitingoutput:=false;
isnumber:=false;
readingnumber:=false;
while(i<L) and (Buffer<> #32) do
begin
Buffer:=conout[i];
if (buffer<>#32) then BufferPlus:=BufferPlus+Buffer;
inc(i);
end;
end;

```

```

//showmessage(BufferPlus+'#');
corregircoma(BufferPlus);
Sortida_Control:=BufferPlus;
if bufferplus = 'Warning:' then
begin
  Error:=1;
  Sortida_Control:='0';
end
else
if bufferplus = 'Given' then
begin
  Error:=2;
  Sortida_Control:='0';
end
else
if bufferplus = 'The' then
begin
  Error:=3;
  Sortida_Control:='0';
end
else
if bufferplus = 'Usage:' then
begin
  Error:= 4;
  Sortida_Control:='0';
end
else
begin
  error:=0;
end;
end;

procedure TForm1.Timer1Timer(Sender: TObject);
var
Hour, Min, Sec, MSec: Word;
XAMin, XAMin, XAMin, XAMin:word;
control:integer;
Fecha,hora:string;
F1,f2,PLC,oPLC:textfile;
iPLC,i,columna,filera:integer;
Buffer,BufferPlus,Sortida_controlador:string;
CmdLine, WorkDir: string;
ConOut: string;
guardardades,data_text:string;

begin
form1.Caption:='Control fuzzy reactor N/D Taradell'+datetimetostr(Now);
DecodeTime(Now,Hour, Min, Sec, MSec);
DecodeTime(Horafutura,HourF, MinF, SecF, MSecF);
control_temps:=control_temps-1;
if (Hour = 23) and (HourF = 0) then
begin
  //No actua
end
else
if (Hour>=HourF) and (Min>=MinF) And (Sec>=SecF)then
begin
  HoraFutura:=ReturnFutureTime(Now, tempsexecucio);
  control_temps:=Tempsexecucio;
  Memol.Lines.Add('>> '+timetostr(Now)+' Càlcul de variables...');
  RedOxi_R1_old:=redoxi_r1 ;
  ODi_R1_old:= ODi_r1;
  RedOxi_R2_old:=redoxi_r2;
  ODi_R2_old:= ODi_r2;
  // creem el fitxer IN.txt d'entrada al controlador fismain
  SODfiltrat_R1:=floattostr(ODi_r1);
  Sredoxfiltrat_r1:=floattostr(redoxi_r1);
  STOD_r1:=floattostr(TOD_r1);
  sTredox_r1:=floattostr(Tredox_r1);
  Adaptacoma(SODfiltrat_R1);
  Adaptacoma(Sredoxfiltrat_r1);
  Adaptacoma(STOD_r1);
  Adaptacoma(sTredox_r1);
  SODfiltrat_R2:=floattostr(ODi_r2);
  Sredoxfiltrat_r2:=floattostr(redoxi_r2);
  STOD_r2:=floattostr(TOD_r2);
  sTredox_r2:=floattostr(Tredox_r2);

```

```

Adaptacoma(SODfiltrat_R2);
Adaptacoma(Sredoxfiltrat_r2);
Adaptacoma(STOD_r2);
Adaptacoma(sTredox_r2);
assignfile(oPLC, 'IN.txt');
rewrite(OPLC);

closefile(oplc);
//executem fismain.exe
cmdline:=directori+'\fismain.exe IN.txt '+fisfile;
workdir:=directori;

SpawnConsole(CmdLine, WorkDir, ConOut);
// procesem la cadena de text generada per fismain.exe
Procesar_Sortida_control(Conout, rangsortides, Error, Sortida_Control);
//Sortida_control:=floattostr(round((strtofloat(sortida_control)*10*740)/10)); // passem
la sortida
// modificació afegida per control incremental
IF form1.Iteracions1 >= 1 THEN
  BEGIN

Sortida_control_temp:=round(strtofloat(sortida_control_old)*strtofloat(Sortida_control));
  END
ELSE
  BEGIN
    Sortida_control_temp:=round(form1.rpml1*strtofloat(Sortida_control));
    inc(form1.iteracions1);
  END;
//memol.Lines.Add(floattostr(form1.rpml1));
//memol.Lines.Add(sortida_control);
//memol.Lines.Add(floattostr(sortida_control_temp));
if sortida_control_temp > 1480 then sortida_control_temp:=1480;
if sortida_control_temp <= 0 then sortida_control_temp:=form1.MINIMES_RPM;
Sortida_control:= floattostr(sortida_control_temp);
// del controlador a rpm
If (error = 1) OR (Error = 2) OR ( error = 3) OR ( error = 4)then
  begin
    //crear_log
    Sortida_control:=sortida_control_old;
    Inc(contador_errores_biol);
    if contador_errores_biol >= 2 then
      begin
        if seguretat1.Checked then Biol_OK:= True
        end
      else
        begin
          Biol_OK :=False;
        end;
      end
    end
  else
    begin
      contador_errores_biol :=0;
    end;
  end;
  .....
```

SCLD_N.FIS

```

[System]
Name='SCLD_N'
Type='mamdani'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=25
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid'

[Input1]
Name='OD'
Range=[0 5]
NumMFs=5
MF1='Molt Baix': 'trapmf', [-1.8 -0.2 0 0.25]
```

```
MF2='Baix': 'trimf', [0 0.25 0.5]
MF3='Normal': 'trimf', [0.5 0.75 1.25]
MF4='Alt': 'trimf', [0.75 1.25 1.5]
MF5='Molt Alt': 'trapmf', [0.75 1.5 5 5]

[Input2]
Name='ORP'
Range=[-100 200]
NumMFs=5
MF1='Molt Baix': 'trapmf', [-200 -200 -80 10]
MF2='Baix': 'trimf', [-30 10 50]
MF3='Normal': 'trimf', [50 10 90]
MF4='Alt': 'trimf', [50 90 130]
MF5='Molt Alt': 'trapmf', [90 150 200 200]

[Output1]
Name='Aeració'
Range=[0.95 1.05]
NumMFs=5
MF1='MNeg': 'trapmf', [0.95 0.95 0.95 0.975]
MF2='Neg': 'trimf', [0.95 0.975 1]
MF3='Cap': 'trimf', [0.975 1 1.025]
MF3='Pos': 'trimf', [1 1.025 1.05]
MF3='MPos': 'trapmf', [1.025 1.05 1.05 1.05]

[Rules]
1 1, 5 (1): 1
1 2, 5 (1): 1
1 3, 3 (1): 1
1 4, 2 (1): 1
1 5, 2 (1): 1
2 1, 5 (1): 1
2 2, 5 (1): 1
2 3, 3 (1): 1
2 4, 2 (1): 1
2 5, 1 (1): 1
3 1, 4 (1): 1
3 2, 4 (1): 1
3 3, 3 (1): 1
3 4, 2 (1): 1
3 5, 1 (1): 1
4 1, 3 (1): 1
4 2, 3 (1): 1
4 3, 2 (1): 1
4 4, 1 (1): 1
4 5, 1 (1): 1
5 1, 3 (1): 1
5 2, 3 (1): 1
5 3, 2 (1): 1
5 4, 1 (1): 1
5 5, 1 (1): 1
```


ANNEX 3. Representacions gràfiques del seguiment realitzat a l'EDAR Taradell.

A continuació es mostren les representacions gràfiques de l'evolució de l'OD, l'ORP i l'aeració de la línia 2 de l'EDAR Taradell, de varis dies del mes de maig i juny del 2005 quan es va realitzar el seguiment de l'aeració quan era regulada segons l'estratègia de consignes (figures A.5 – A.9); i de varis dies del mes de setembre i octubre del 2005 quan es va dur a terme la validació del SCLD_N (figures A.10 – A.15) i que s'analitzen en el capítol V, apartat V.6.3.

CONSIGNES

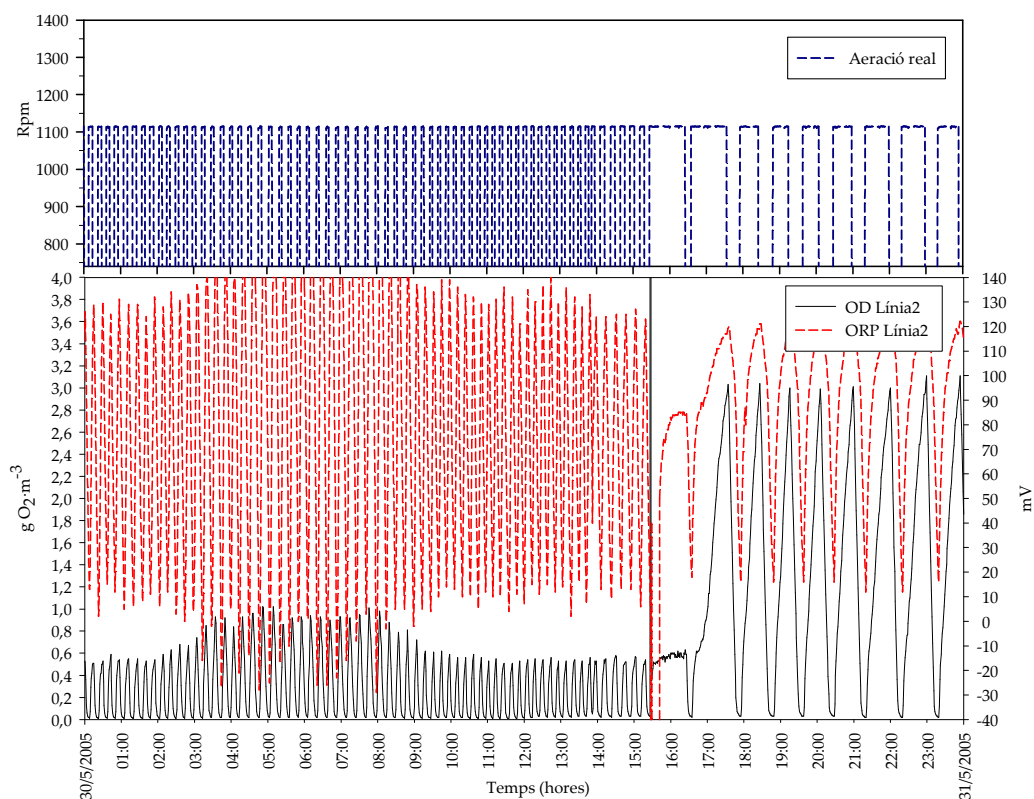


Figura A.5. Evolució de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador per l'aeració segons CONSIGNES a la línia2 del dia 30 de maig del 2005.

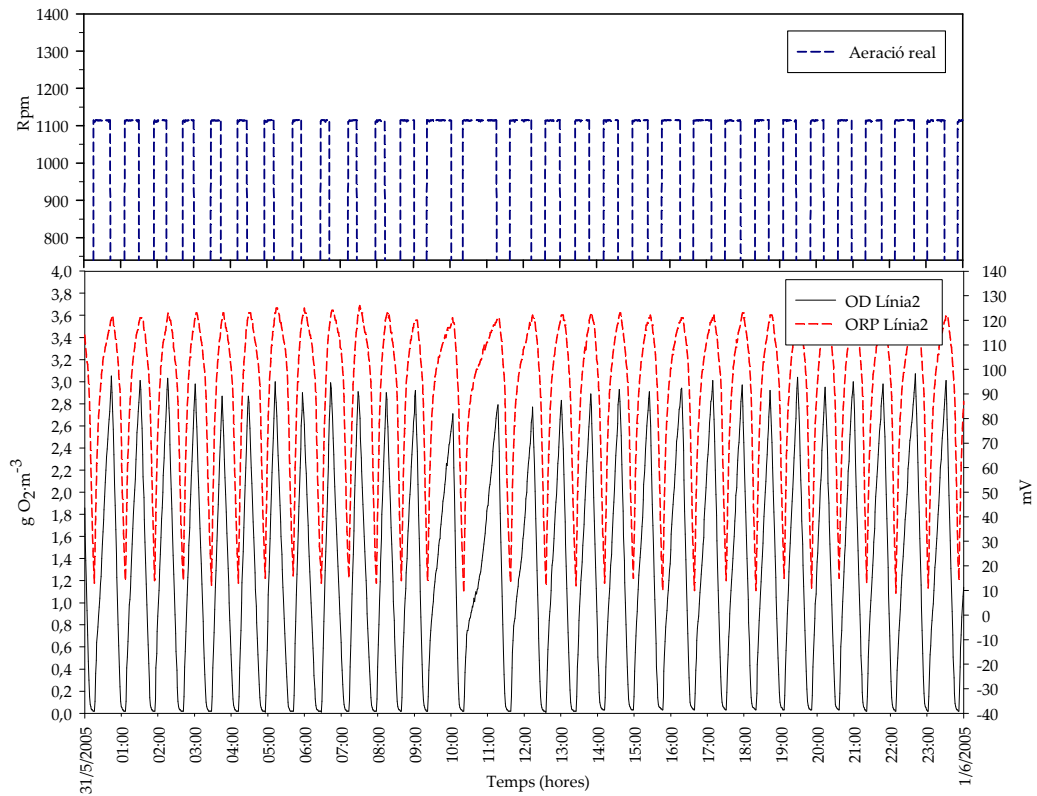


Figura A.6. Evolució de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador per l'aeració segons CONSIGNES a la línia2 del dia 31 de maig del 2005.

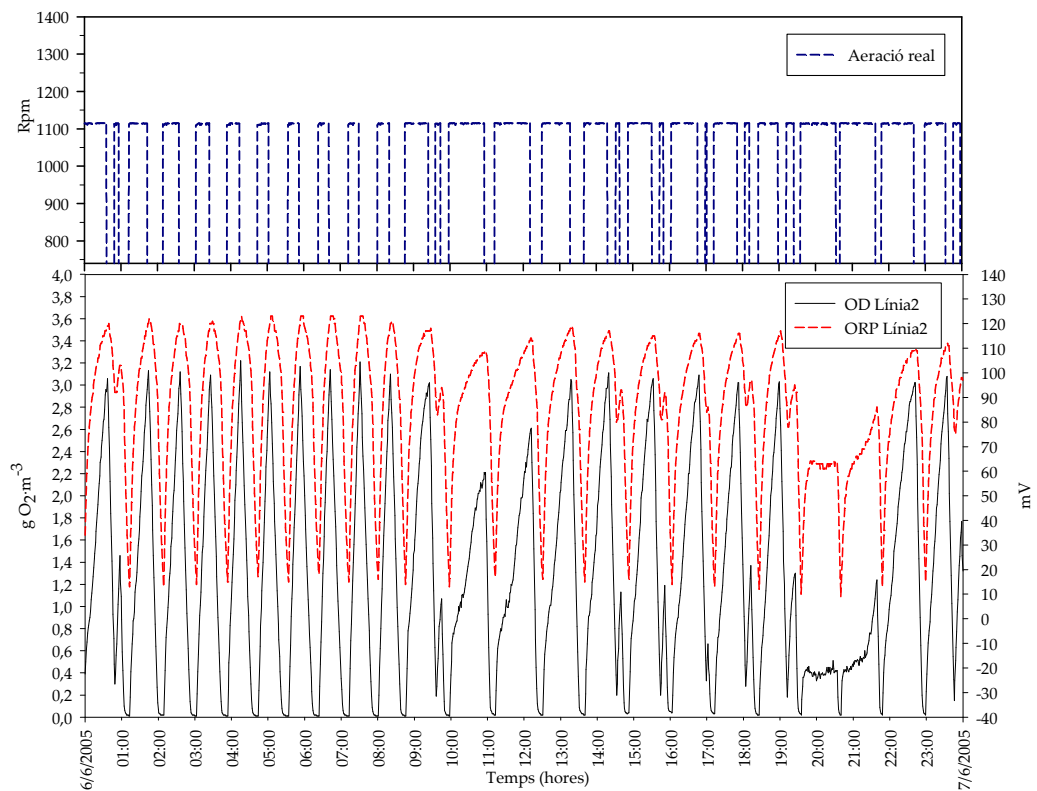


Figura A.7. Evolució de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador per l'aeració segons CONSIGNES a la línia2 del dia 6 de juny del 2005.

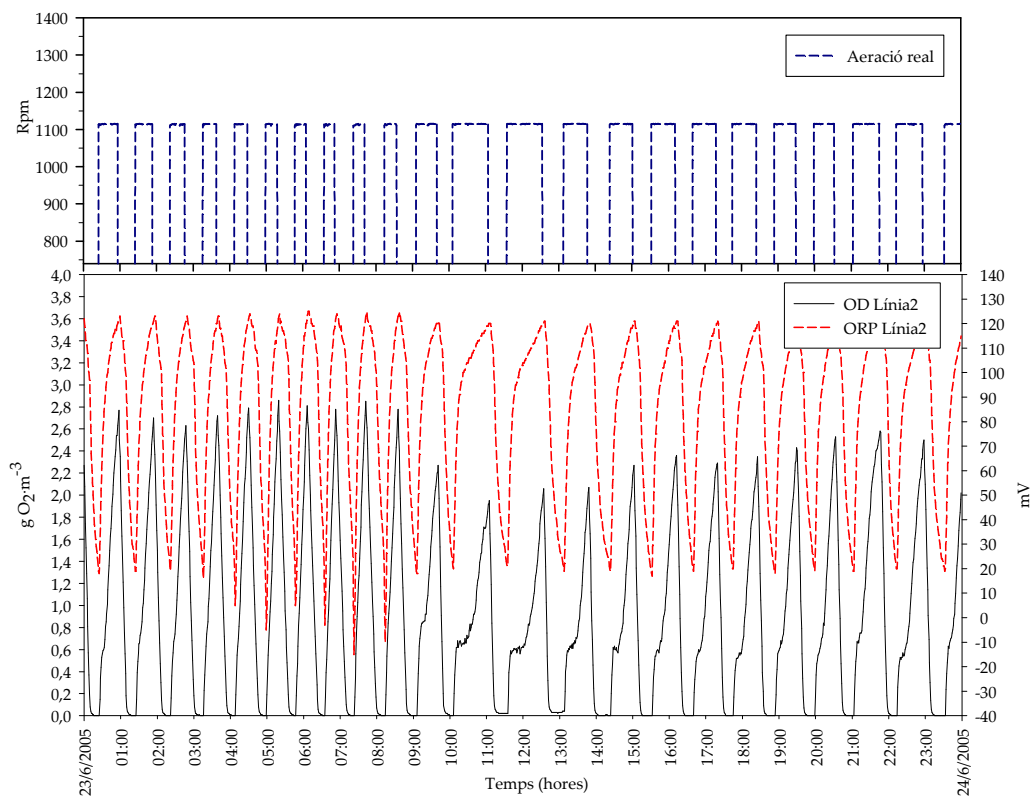


Figura A.8. Evolució de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador per l'aeració segons CONSIGNES a la línia2 del dia 23 de juny del 2005.

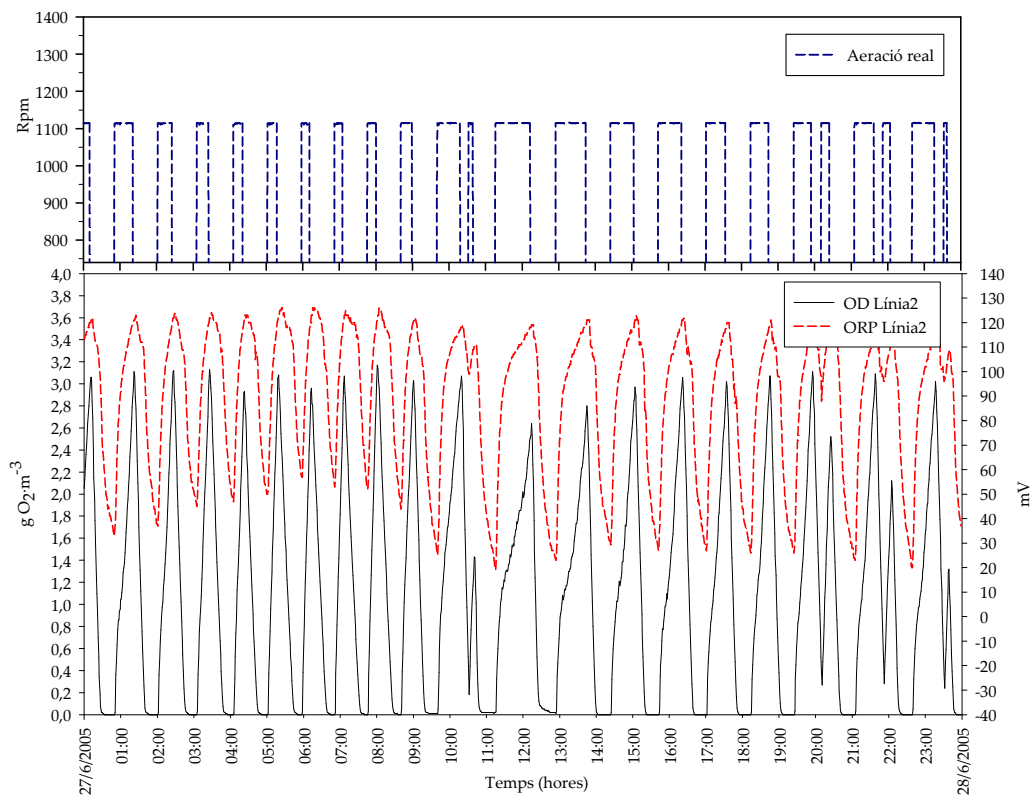


Figura A.9. Evolució de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador per l'aeració segons CONSIGNES a la línia2 del dia 27 de juny del 2005.

SCLD_N

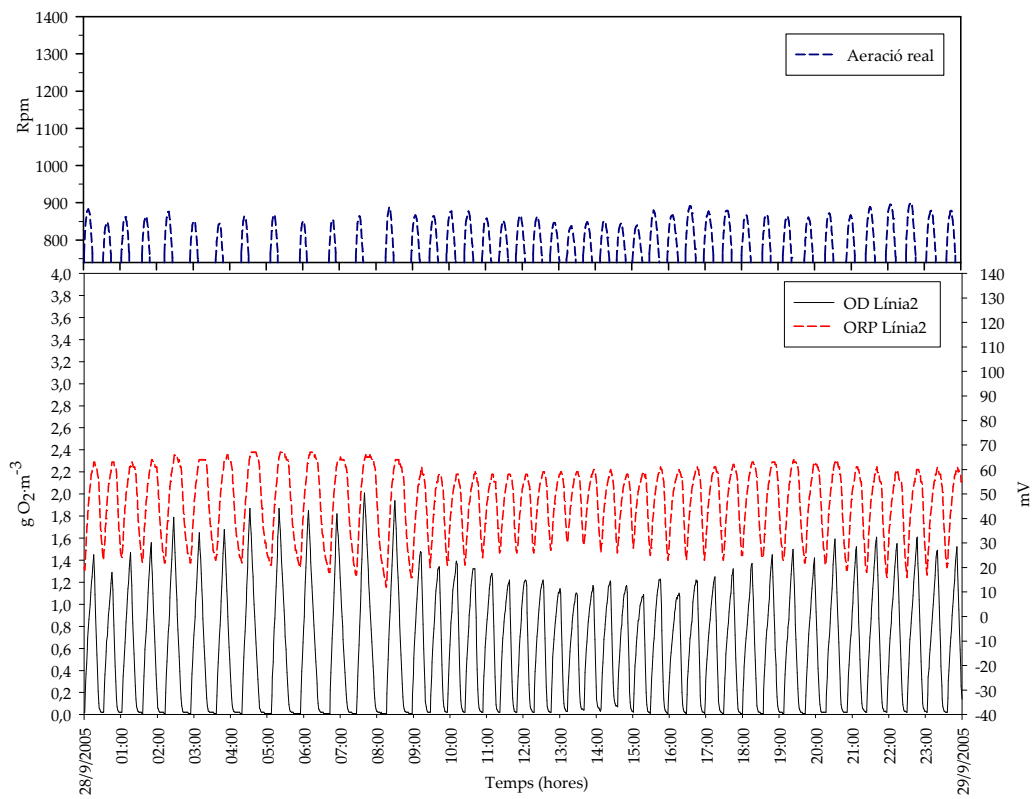


Figura A.10. Evolució de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador per l'aeració segons el SCLD_N a la línia2 del dia 28 de setembre del 2005.

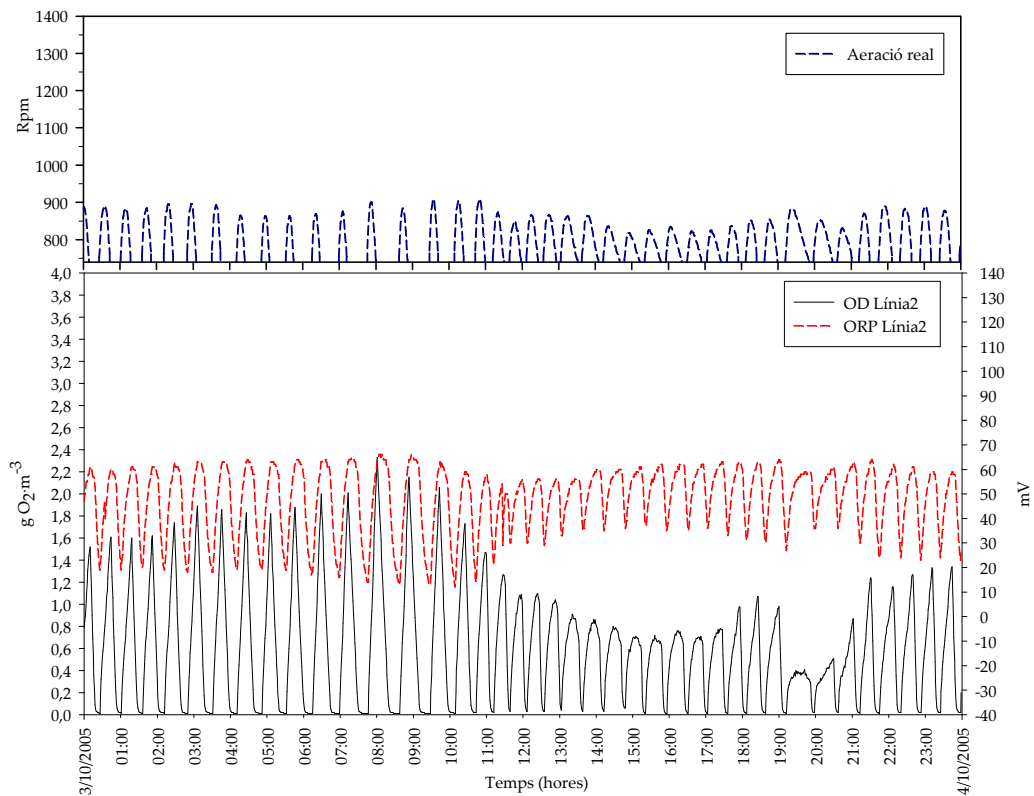


Figura A.11. Evolució de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador per l'aeració segons el SCLD_N a la línia2 del dia 3 d'octubre del 2005.

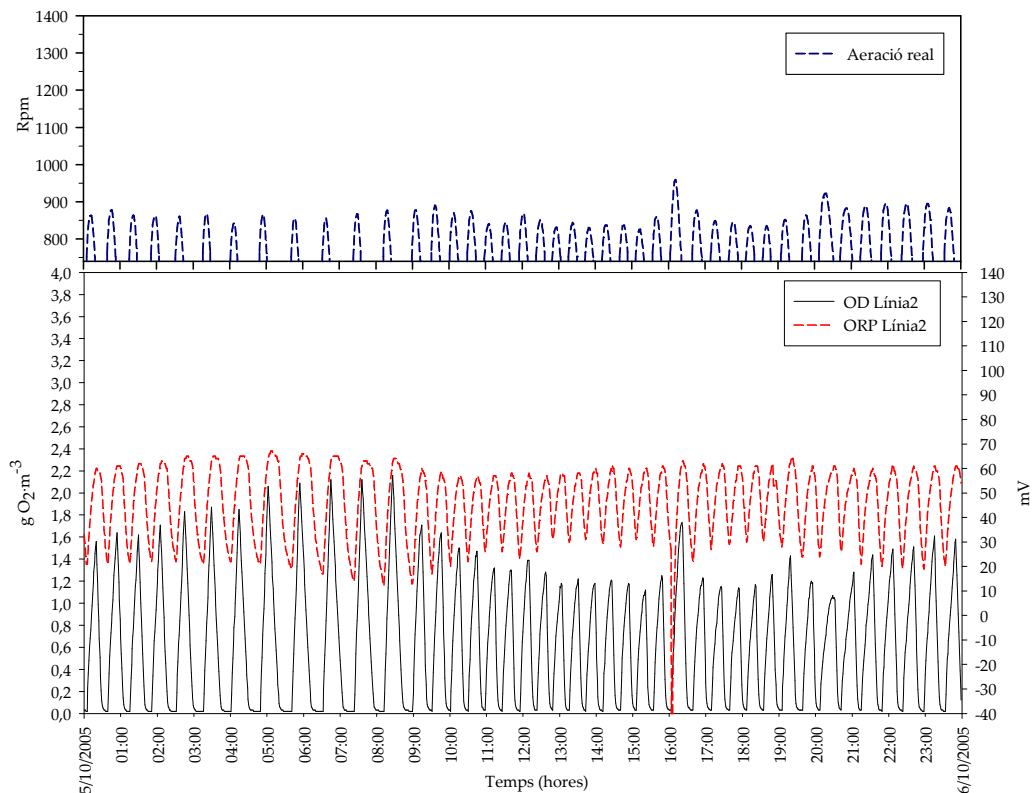


Figura A.12. Evolució de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador per l'aeració segons el SCLD_N a la línia2 del dia 5 d'octubre del 2005.

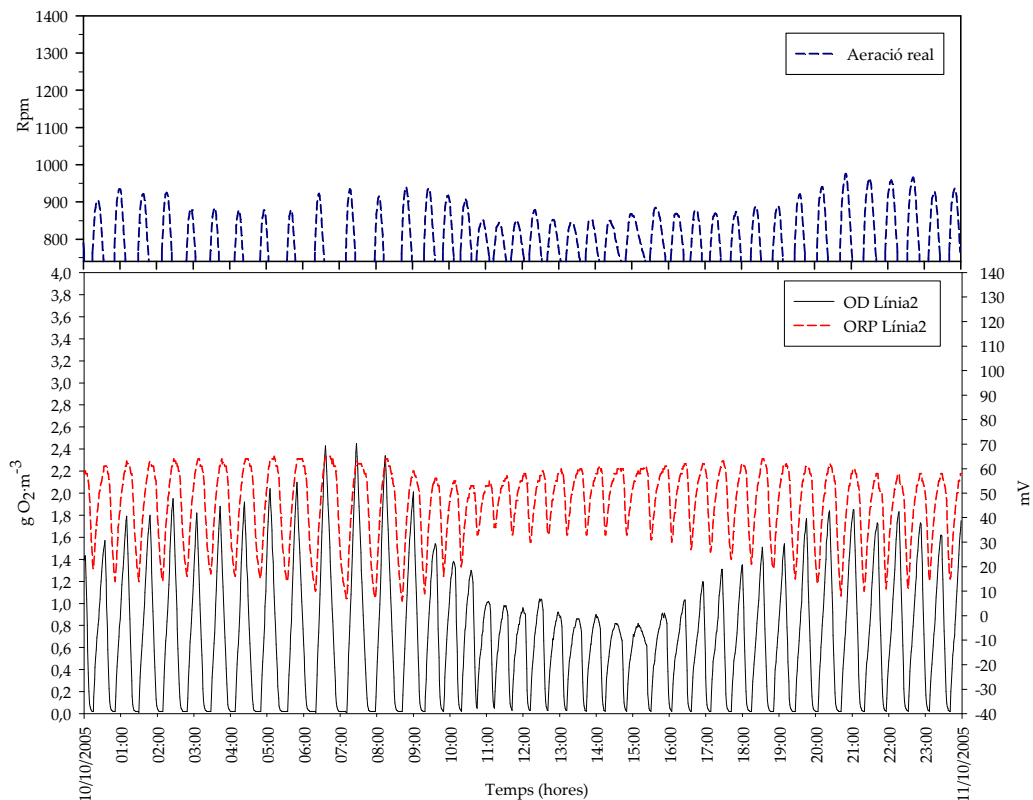


Figura A.13. Evolució de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador per l'aeració segons el SCLD_N a la línia2 del dia 10 d'octubre del 2005.

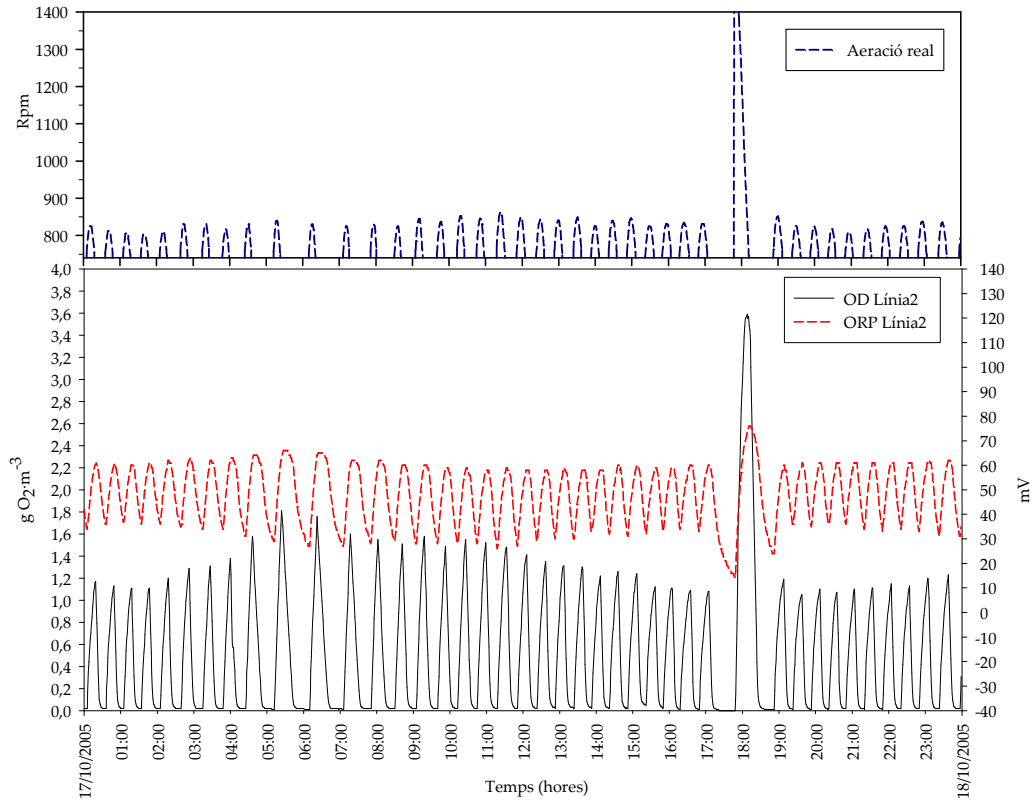


Figura A.14. Evolució de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador per l'aeració segons el SCLD_N a la línia2 del dia 17 d'octubre del 2005.

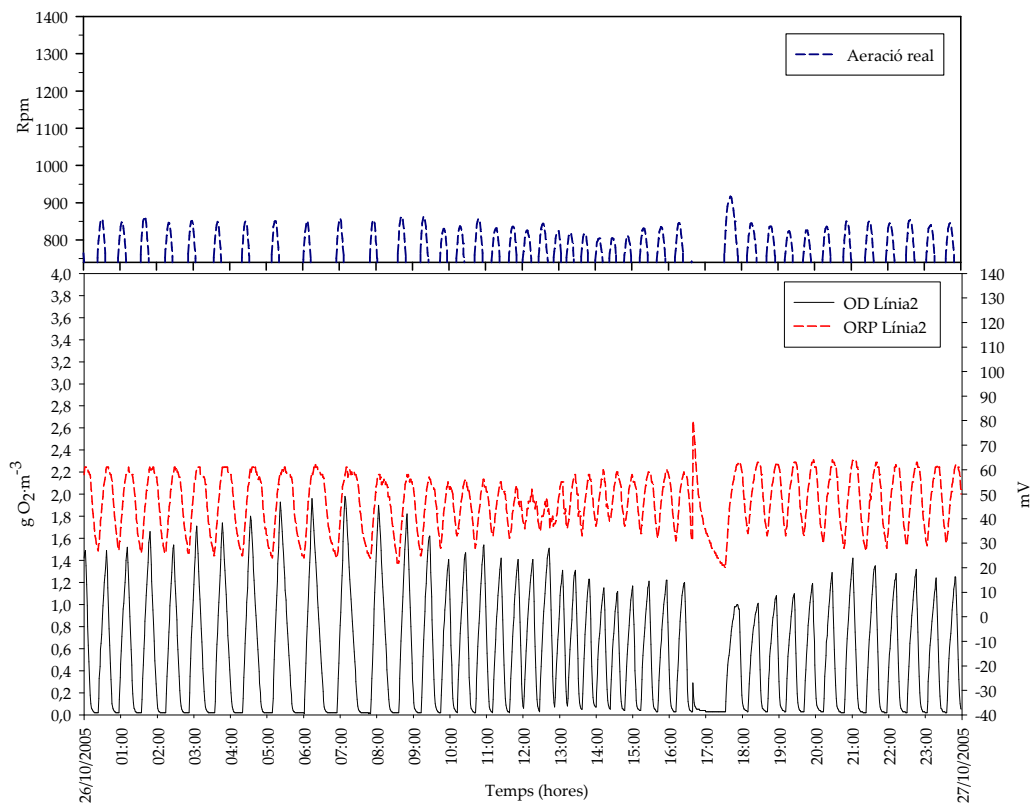


Figura A.15. Evolució de l'OD, l'ORP i les rpm del bufador per l'aeració segons el SCLD_N a la línia2 del dia 26 d'octubre del 2005.

*El que ens queda per fer
ho hem de fer entre els dos
amb la unitat de paraules i acords.*

*Que no s'apague la llum
que no vacil·le mai més
construïm un país de llums enceses.*

*Que no càpia més llum
i que peten els ploms
il·luminant la nit amb l'esperança.*

*Oblidem el passat
no pensem el futur
i deixem que el demà comence ara.*

*No podré mirar als ulls
als infants del meu lloc
si sé que no vaig fer el que calia.*

*És humil el meu cant
però hi ha moltes veus
que reclamen a crits que les escolten.*

*Vivim, vivim somniant
empeny fins que algun dia siga realitat.*

Feliu Ventura ('Que no s'apague la llum')

