

# IMPLEMENTACIÓ D'EINES AVANÇADES DE CONTROL PER A L'ELIMINACIÓ DE NITROGEN I OPTIMITZACIÓ DELS COSTOS ENERGÈTICS A L'EDAR DE LA VALL DEL GES

**Neus Pellicer Johera**

Dipòsit legal: Gi. 121-2014

<http://hdl.handle.net/10803/133154>

**ADVERTIMENT.** L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

**ADVERTENCIA.** El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

**WARNING.** Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



**TESI DOCTORAL**

**IMPLEMENTACIÓ D'EINES AVANÇADES DE CONTROL PER A  
L'ELIMINACIÓ DE NITROGEN I OPTIMITZACIÓ DELS COSTOS  
ENERGÈTICS A L'EDAR DE LA VALL DEL GES.**

**Neus Pellicer i Johera**

2013





## **TESI DOCTORAL**

# **IMPLEMENTACIÓ D'EINES AVANÇADES DE CONTROL PER A L'ELIMINACIÓ DE NITROGEN I OPTIMITZACIÓ DELS COSTOS ENERGÈTICS A L'EDAR DE LA VALL DEL GES.**

Neus Pellicer i Johera

2013

CIÈNCIES EXPERIMENTALS I SOSTENIBILITAT

Directors: Dr. Manel Poch Espallargas i Dr. Félix Carrasco Alonso

Memòria presentada per optar al títol de doctora per la Universitat de Girona





El Dr. Manel Poch Espallargas i el Dr. Félix Carrasco Alonso, Catedràtics d'Universitat del Departament d'Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia Agroalimentària de la Universitat de Girona,

CERTIFIQUEN:

Que el treball titulat "Implementació d'eines avançades de control per a l'eliminació de nitrogen i optimització dels costos energètics a l'EDAR de la Vall del Ges", presentat per Neus Pellicer Johera per a l'obtenció del títol de doctora, ha estat realitzat sota la seva direcció.

Manel Poch Espallargas

Félix Carrasco Alonso

Girona, a 30 juliol de 2013



“L’AIGUA ÉS UN CAOS SENSIBLE”

G. Philipp Freiherr von Hardenberg

Novalis





## AGRAÏMENTS

Primerament voldria agrair a La Universitat de Girona l'oportunitat que m'ha donat a través del seu Pla de Desenvolupament Professional per a la realització de la meva tesi, ja que no hauria estat possible sense aquest suport.

Vull també donar gràcies als meus directors, Drs. Manel Poch Espallargas i Félix Carrasco Alonso, per l'esforç que han dispensat en el seu seguiment, el temps que hi han dedicat, els seus bons consells, el seu suport sempre incondicional i sobretot per l'ajuda rebuda en els moments més crítics. Gràcies a tots dos per la confiança que m'heu donat durant l'elaboració del treball.

També voldria mostrar el meu agraïment a un conjunt de persones que en un moment o un altre m'han mostrat el seu bon fer i companyonia: Al Quim Comas, membre de l'Institut de Medi Ambient i del grup de recerca del LEQUIA, i al Joan Subiranas per haver-me acompanyat en una etapa inicial de la tesi. Gràcies pels viatges a Torelló i haver-me presentat els experts del grup de Depuradores d'Osona. Un record especial per al Josep Serrat que sempre tenia a mà una solució als problemes, acompanyada de bon humor. Al David Güell pel seu dinamisme i sobretot al més sofert del grup, el Roger Castellnou, que ja he perdut el compte de quantes vegades t'he enviat e-mails i t'he fet visites per consultar-te els meus dubtes i demanar-te informació.

No voldria pas oblidar-me d'una persona que ha estat molt important en una segona fase de la tesi, el Lluís Corominas, investigador post doctoral i membre de l'ICRA, que ha sabut transmetre'm el seus coneixements, la seva il·lusió i empenta perquè les coses sortissin bé. Perdona Lluís per les múltiples interrupcions a les teves tasques i gràcies pels teus consells i eternes visites a l'EPS.

A l'Ignasi Aymerich, la nova sang que s'ha incorporat al grup i al Narcís Clara, professor del Departament d'Informàtica i Matemàtica Aplicada de la Universitat de Girona pels seus aclariments en temes estadístics.

Gràcies a L'Ester Gifra, professora i membre del Departament d'Arquitectura i Enginyeria de la Construcció de l'EPS i al Jordi Baquero, membre del Departament de Gestió empresarial i Disseny del Producte, també de l'EPS, per haver-me orientat en les parts més importants de la construcció de tancs.

Finalment a tots els companys del Departament d'Enginyeria Química Agrària i Tecnologia Agroalimentària, per la seva solidaritat i el seu incondicional suport.

A tot ells: Moltes gràcies!.



Esta tesis ha sido realizada en el marco del proyecto ENDERUS (CTM2009-13018) con financiación del Ministerio de Economía i Competitividad (MINECO).



## RESUM

Les estacions depuradores d'aigües residuals presenten actualment una doble problemàtica: 1) assolir rendiments de depuració adequats; 2) aconseguir-ho amb costos mínims. Són moltes les estratègies que es poden aplicar per tal de cobrir aquestes necessitats, però no són aplicables de manera indiscriminada.

En aquesta tesi s'estudia l'EDAR de la Vall del Ges (Barcelona), que presenta una capacitat de tractament de 42000 h.eq. i, mitjançant el sistema Orbal, elimina, de manera efectiva, el fòsfor per precipitació química i el nitrogen de manera biològica. A fi de mantenir el rendiment de la desnitrificació i disminuir els costos energètics de l'aeració, s'han aplicat diferents estratègies per tal de resoldre les problemàtiques prèviament citades:

1. Utilitzar un tanc pulmó que permeti l'emmagatzematge de les puntes que rep la planta durant el dia per ésser tractades durant la nit, període en què el preu de l'energia és més econòmic.
2. Aplicar un sistema basat en regles *ON/OFF* a l'aportació d'aire en els reactors aerobis. Aquesta estratègia no implicaria cap modificació important en el sistema d'aeració actual.
3. Controlar l'aeració a partir de les concentracions d' $\text{NH}_4^+$  i d' $\text{NO}_3^-$  mesurades en l'efluent, essent la variable manipulada l'aportació d'oxigen en els reactors aerobis.
4. Determinar la ubicació més favorable dels sensors, desenvolupant una altra estratègia de control de l'aeració on les concentracions d' $\text{NH}_4^+$  i d' $\text{NO}_3^-$  són mesurades a l'interior del propi reactor biològic.
5. Utilitzar un sistema de control PI, ubicant un sensor d' $\text{NH}_4^+$  dins del reactor biològic. Aquesta estratègia implicaria la instal·lació de variadors de freqüència en els sistemes d'aeració.
6. Millorar el sistema de control PI, adaptant en continu els *set points* d' $\text{NH}_4^+$  segons el sistema tarifari de la planta.

Aquest treball presenta dues innovacions significatives per al desenvolupament d'estratègies de control en les EDAR:

1. S'ha plantejat una estratègia de control capaç d'adaptar en continu els *set points* d' $\text{NH}_4^+$  en funció del sistema tarifari de la planta, la qual cosa ha permès obtenir uns resultats molt favorables respecte de la minimització dels costos d'aeració.
2. S'ha inclòs en les simulacions un mòdul inspector, capaç de determinar el risc d'incompliments que es poden presentar segons el sistema de control utilitzat. Això ha constituït una eina excel·lent per a la presa de decisions a l'hora de seleccionar el sistema més adequat per a l'EDAR.

El treball s'ha presentat en cinc capítols i un apèndix:

1. En el Capítol 1 s'inclou la informació adient sobre els sistemes d'eliminació biològica del nitrogen, especialment el sistema Orbal així com l'estat actual de les EDAR a Catalunya. S'introdueix el control com a possible solució a la optimització dels costos energètics mantenint els rendiments d'eliminació de nitrogen.
2. El Capítol 2 presenta els objectius del treball.
3. El Capítol 3 exposa la metodologia utilitzada per assolir el manteniment en l'eliminació de nitrogen i l'optimització dels costos energètics a l'EDAR de La Vall del Ges.
4. El Capítol 4 mostra els resultats obtinguts aplicant les diferents estratègies a l'EDAR de La Vall del Ges.
5. El Capítol 5 aporta les conclusions de la tesi i proposa els treballs que es podrien desenvolupar en el futur.

## RESUMEN

Las estaciones depuradoras de aguas residuales presentan actualmente una doble problemática: 1) Obtener rendimientos de depuración adecuados; 2) Conseguirlo con costos mínimos. Son muchas las estrategias susceptibles de ser aplicadas para cubrir estas necesidades, pero no son aplicables de forma indiscriminada.

En esta tesis, se estudia la EDAR de la Vall del Ges (Barcelona), la cual presenta una capacidad de tratamiento de 42000 h.eq. Esta planta utiliza el sistema Orbal y elimina eficientemente el fósforo (por precipitación química) y el nitrógeno (de forma biológica). Con el objetivo de mantener el rendimiento de desnitrificación y disminuir los costos energéticos relativos a la aireación, se han aplicado diversas estrategias, en vistas a solucionar las problemáticas previamente mencionadas.

- 1) Utilizar un tanque pulmón que permita el almacenamiento de las puntas que recibe la planta durante el día, con el objeto de ser tratadas durante la noche, período en el cual el precio de la energía es menor.
- 2) Aplicar un sistema basado en reglas *ON/OFF* a la aportación de aire en los reactores aerobios. Tal estrategia no implicaría modificación alguna en el sistema de aireación actual.
- 3) Controlar la aireación a partir de las concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  en el efluente, siendo la variable manipulada la aportación de oxígeno en los reactores aerobios.
- 4) Determinar la ubicación más favorable de los sensores, desarrollando otra estrategia de control, en la cual las concentraciones de  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{NO}_3^-$  se miden en el propio reactor biológico.
- 5) Utilizar un sistema de control PI, ubicando un sensor de  $\text{NH}_4^+$  dentro del reactor biológico. Esta estrategia implicaría la instalación de variadores de frecuencia en los sistemas de aireación.
- 6) Mejorar el sistema de control PI, adaptando en continuo los puntos de consigna de amonio, en función del sistema tarifario de la planta.

Este trabajo presenta dos innovaciones significativas para el desarrollo de estrategias de control de las EDAR:

- 1) Se ha planteado una estrategia de control, capaz de adaptar en continuo los puntos de consigna de la concentración de  $\text{NH}_4^+$ , en función del sistema tarifario de la planta.
- 2) Se ha incluido en las simulaciones un módulo inspector, capaz de cuantificar el riesgo de incumplimientos que pueden tener lugar, según el sistema de control utilizado. Se trata de una excelente herramienta para la toma de decisiones a la hora de seleccionar el sistema más adecuado para la EDAR.



El trabajo se ha presentado en cinco capítulos y un apéndice:

- 1) En el Capítulo 1 se incluye la información pertinente sobre los sistemas de eliminación biológica del nitrógeno en especial el sistema Orbal, así como el estado actual de las EDAR en Cataluña, se introduce el control como potencial solución para el ahorro energético y el mantenimiento de los rendimientos de eliminación de nitrógeno.
- 2) El Capítulo 2 presenta los objetivos del trabajo.
- 3) El Capítulo 3 expone la metodología utilizada con el fin de optimizar los costos energéticos en la EDAR de la Vall del Ges manteniendo los niveles de eliminación de nitrógeno.
- 4) El Capítulo 4 muestra los resultados obtenidos, aplicando las diferentes estrategias a la EDAR de la Vall del Ges.
- 5) El Capítulo 5 ilustra las conclusiones de la tesis y propone potenciales trabajos a desarrollar en el futuro.

## ABSTRACT

Wastewater treatment plants currently present two issues: 1) Get adequate depuration performance; 2) Do it with minimal costs. There are many strategies that can be applied to achieve these requirements, but they cannot be applied indiscriminately.

In this thesis, we study the WWTP of "La Vall del Ges" (Barcelona, Spain), which has a treatment capacity of 42000 h.eq. This Orbal plant operates to efficiently remove phosphorus (by chemical precipitation) and nitrogen (by biological treatment). With the objective of maintaining nitrogen removal performance and reducing aeration energy costs, various strategies have been implemented in order to solve the above mentioned issues:

1. To use a buffer tank to store the tips received by the plant during the day in order to be treated during the night, with a lower energy price.
2. To implement ON/OFF rules to the air supply in aerobic reactors. Such a strategy would not involve any modifications in the aeration system.
3. To control the aeration by taking into consideration  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  effluent concentrations. The oxygen supply in aerobic reactors is the manipulated variable.
4. To determine the most favorable sensors location, by developing another control strategy, in which  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  concentrations are measured in the biological reactor.
5. To use a PI control system, by placing an  $\text{NH}_4^+$  sensor in the biological reactor. This strategy would involve installing frequency converters in the aeration system.
6. To improve the PI control system, by continuously adapting the ammonium set point, by considering the plant tariff system.

This work presents two significant innovations for the development of WWTP control strategies:

1. It has been proposed a control strategy capable to continuously adapt the set points of  $\text{NH}_4^+$  concentrations, depending on the plant tariff system. By doing that, aeration costs have been minimized.
2. It has been included in the simulations an inspector module, capable to quantify the risk of violations that may occur, depending on the control system used. It is an excellent tool for decision making in selecting the most appropriate WWTP control system.

The work is presented in five chapters and one appendix.

- 1) Chapter 1 include information about the different systems of biological nitrogen removal, especially the Orbal system, and current state of WWTPs in Catalonia. Introduce the control as a possible solution to save energy and nitrogen improve.
- 2) Chapter 2 presents the main aims of the work.
- 3) Chapter 3 includes the methodology used to achieve improved nitrogen and optimization energy costs to the Vall del Ges WWTP.
- 4) Chapter 4 shows the application of the methodology presented in the Chapter III applied at Vall del Ges WWTP.
- 5) Chapter 5 provides the conclusions of the study and proposes potential jobs that could be developed based on this study.

# ÍNDEX

	Pàg.
ÍNDEX .....	i
RELACIÓ D'ACRÒNIMS .....	xiii
<b>1. INTRODUCCIÓ</b> .....	<b>1</b>
1.1. ESTACIONS DEPURADORES D'AIGÜES RESIDUALS (EDAR) .....	2
1.1.1. ELIMINACIÓ BIOLÒGICA DEL NITROGEN .....	4
1.1.2. CONFIGURACIONS EBNI .....	7
1.1.2.1. ANÀLISI DEL SISTEMA ORBAL™ COM A SISTEMA D'ELIMINACIÓ BIOLÒGICA DE NITROGEN I FÒSFOR.....	11
1.2. ESTAT ACTUAL DELS SISTEMES DE SANEJAMENT A CATALUNYA .....	12
1.3. EL VINCLE AIGUA-ENERGIA .....	15
1.3.1. CONSUM ENERGÈTIC A L'EDAR DE LA VALL DEL GES .....	16
1.4. ESTRUCTURES BÀSIQUES DE CONTROL .....	18
1.4.1. NIVELLS DE CONTROL A LES EDAR .....	23
1.5. EVOLUCIÓ DEL CONTROL A LES EDAR .....	24
1.6. LES SIMULACIONS COM A EINA D'ANÀLISI I AVALUACIÓ .....	38
<b>2. OBJECTIUS</b> .....	<b>39</b>
<b>3. MATERIALS I MÈTODES</b> .....	<b>43</b>
3.1. EDAR DE LA VALL DEL GES .....	45
3.2. MODELS BIOLÒGICS .....	47
3.2.1. MODEL BIOLÒGIC ASM1 PRINCIPALS PROCESSOS I COMPONENTS .....	47
3.2.1.1. ALTERNATIVES ALS VALORS DE LES CONSTANTS CINÈTIQUES I ESTEQUIOMÈTRIQUES .....	57
3.2.2. MODEL DE SEDIMENTACIÓ .....	59
3.2.3. CRITERIS D'AVUACIÓ .....	60
3.2.3.1. MÒDUL INSPECTOR .....	63

	Pàg.
3.3. METODOLOGIA PER AL CALIBRATGE D'UNA EDAR .....	66
3.3.1. PROTOCOL DE CALIBRATGE .....	66
3.3.1.1. DEFINICIÓ DEL PROJECTE .....	66
3.3.1.2. ADQUISICIÓ I CONCILIACIÓ DE DADES .....	68
3.3.1.3. CONSTRUCCIÓ DEL MODEL .....	68
3.3.1.4. CALIBRATGE I VALIDACIÓ .....	68
3.3.1.5. SIMULACIÓ I INTERPRETACIÓ DE RESULTATS .....	69
3.4. ANÀLISI DE SENSIBILITAT .....	69
3.4.1. ANÀLISI DE SENSIBILITAT GLOBAL .....	69
3.4.2. ANÀLISI DE SENSIBILITAT LOCAL .....	70
3.4.2.1. DESENVOLUPAMENT DE L'ANÀLISI DE SENSIBILITAT LOCAL .....	72
3.5. PLATAFORMA INFORMÀTICA PER ALS ESTUDIS DE SIMULACIÓ. PROGRAMA WEST® .....	73
<b>4. RESULTATS I DISCUSSIÓ .....</b>	<b>75</b>
4.1. MODELITZACIÓ I CALIBRATGE DE L'EDAR DE LA VALL DEL GES .....	77
4.1.1. DEFINICIÓ DEL PROJECTE .....	77
4.1.2. ADQUISICIÓ I CONCILIACIÓ DE DADES .....	77
4.1.2.1. CARACTERÍSTIQUES DE L'INFLUENT D'ENTRADA .....	79
4.1.2.2. MESURES DE CABAL DE L'INFLUENT .....	81
4.1.2.3. CARACTERÍSTIQUES DE L'EFLUENT .....	81
4.1.2.4. CONTROL D'OPERACIÓ DE LA PLANTA .....	83
4.1.2.5. CAPACITAT D'AERACIÓ .....	83
4.1.2.6. COSTOS ENERGÈTICS ASSOCIATS AL FUNCIONAMENT DE L'EDAR .....	85
4.1.2.7. CONCILIACIÓ DE DADES .....	88
4.1.3. CONFIGURACIÓ DEL MODEL .....	92
4.1.3.1. CONSTRUCCIÓ DEL MODEL DE PLANTA .....	93
4.1.4. CALIBRATGE I VALIDACIÓ .....	93
4.1.4.1. CÀLCUL DE L'INFLUENT ESTACIONARI .....	94
4.1.4.2. GENERACIÓ DE L'INFLUENT DINÀMIC .....	94
4.1.4.3. CALIBRATGE DEL MODEL BIOLÒGIC .....	95

	Pàg.
4.1.4.3.1. PROTOCOL DE CALIBRATGE .....	95
4.1.4.3.2. ANÀLISI DE SENSIBILITAT .....	96
4.1.4.3.3. CALIBRATGE EN ESTAT ESTACIONARI .....	103
4.1.4.3.4. CALIBRATGE EN ESTAT DINÀMIC .....	104
4.1.5. SIMULACIÓ I INTERPRETACIÓ DE RESULTATS .....	105
<b>4.2. ESTRATÈGIES PER A LA REDUCCIÓ DELS COSTOS ENERGÈTICS A L'EDAR DE LA VALL DEL GES .....</b>	<b>110</b>
4.2.1. UTILIZACIÓ D'UN TANC PULMÓ .....	110
4.2.2. AVALUACIÓ DE COSTOS DELS DIPÒSITS PER A LES OPCIONS PRESENTADES .....	112
4.2.3. AVALUACIÓ DE LES INVERSIONS PER A LES OPCIONS PRESENTADES .....	118
<b>4.3. SELECCIÓ DEL SISTEMA DE CONTROL .....</b>	<b>122</b>
4.3.1. SIMULACIÓ EN OPEN-LOOP. SISTEMA ACTUAL 'OPERACIÓ DE L'EDAR .....	122
4.3.2. AVALUACIÓ DE LES DIFERENTS ESTRATÈGIES DE CONTROL .....	124
4.3.2.1. ESTRATÈGIA DE CONTROL OD EN EL REACTOR ASU-4 .....	124
4.3.2.2. ESTRATÈGIA DE CONTROL OD-NH-NO EN L'EFLUENT .....	127
4.3.2.3. ESTRATÈGIA DE CONTROL OD-NH-NO SENSOR EN EL REACTOR BIOLÒGIC .....	132
4.3.2.4. ESTRATÈGIA DE CONTROL PI EN CASCADA .....	133
4.3.2.4.1. ESTRATÈGIA DE CONTROL PI EN CASCADA RELACIONAT AMB EL SISTEMA TARIFARI DE L'EDAR .....	136
<b>5. CONCLUSIONS .....</b>	<b>145</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>149</b>
<b>APÈNDIX .....</b>	<b>157</b>



## LLISTAT DE FIGURES

---

Capítol 1	Pàg.
1.1 : Esquema d'una estació depuradora de fangs activats. ....	2
1.2 : Esquema del procés de fangs activats. ....	3
1.3 : Representació esquemàtica del metabolisme bacterià autòtrof quimiosintètic. ..	4
1.4 : Representació esquemàtica del metabolisme bacterià heteròtrof. ....	6
1.5 : Esquema de configuració Ludzack-Ettinger. ....	7
1.6 : Esquema de configuració Ludzack-Ettinger modificada. ....	7
1.7 : Esquema de configuració carroussel. ....	8
1.8 : Esquema de configuració d'alimentació esglaonada. ....	8
1.9 : Esquema de configuració Wuhrmann. ....	9
1.10: Esquema de configuració Bardenpho. ....	9
1.11: Esquema de configuració de doble etapa. ....	9
1.12: Esquema de configuració SBR. ....	10
1.13: Esquema de configuració Nitrox. ....	10
1.14: Esquema de configuració Orbal <sup>TM</sup> . ....	11
1.15: Distribució dels abocaments a les conques receptores de les EDAR catalanes. ...	13
1.16: Distribució dels tractaments addicionals en les EDAR de fangs activats. ....	14
1.17: Distribució per capacitats de les EDAR amb eliminació de matèria orgànica. ....	15
1.18: Distribució del consum elèctric a l'EDAR de la Vall del Ges durant l'any 2009. ....	17
1.19: Esquema de control en llaç obert. ....	19
1.20: Esquema de control per retroalimentació ( <i>feedback</i> ). ....	20
1.21: Esquema d'un control anticipatiu amb un llaç de retroalimentació acoblat. ....	21
1.22: Esquema de control adaptatiu. ....	21
Capítol 3	
3.1: Esquema de l'EDAR de la Vall del Ges. ....	46
3.2: Principals processos del model ASM1. ....	47
3.3: Components fraccionats de la DQO. ....	51
3.4: Components fraccionats del nitrogen total. ....	51
3.5: Relació entre variables d'estat i les transformacions en el model ASM1. ....	52
3.6: Exemple gràfic d'avaluació dels incompliments. ....	65



	Pàg.
3.7: Esquema del protocol de calibratge GMP. ....	67
3.8: Editor gràfic WEST. Desplegament de la llibreria de nodes. ....	74
 Capítol 4	
4.1: Relació de concentració orgànica i sòlids a l'EDAR durant l'any 2009. ....	80
4.2: Relació de N-NTK i N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> a l'influent durant l'any 2009. ....	80
4.3: Evolució del cabal d'entrada a L'EDAR durant l'any 2009. ....	81
4.4: Concentració de TSS,DQO i DBO en l'efluent. ....	82
4.5: Concentracions de N total i amoni en l'efluent. ....	82
4.6: Distribució dels rotors en el reactor biològic. ....	84
4.7: Consum energètic total a L'EDAR durant l'any 2009. ....	85
4.8: EDAR de la Vall del Ges. Distribució del sistema de bombament. ....	87
4.9: Diagrama de blocs de l'EDAR per al càlcul de balanços. ....	88
4.10: Configuració de L'EDAR de la Vall del Ges. ....	93
4.11: Esquema protocol de calibratge del model biològic. ....	96
4.12: Gràfic de simulació referència/pertorbació. ....	99
4.13: Sensibilitat relativa per a la variable TSS. ....	100
4.14: Sensibilitat relativa per a la variable OD. Zona aeròbia. ....	101
4.15: Sensibilitat relativa per a la variable NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> en l'efluent. ....	101
4.16: Sensibilitat relativa per a la variable NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en l'efluent. ....	102
4.17: Comparació dels errors relatius en el calibratge en front del límit de N total. ....	107
4.18: Comparació entre els valors de sortida de la planta i els valors de sortida del model. ....	108
4.19: Evolució de la concentració d'amoni, nitrats i TSS en el efluent. Simulació en dinàmic. ....	109
4.20: Exigències de volum per a l'emmagatzematge de puntes. ....	111
4.21: Variació del VAN en funció de l'estalvi energètic per a les tres opcions d'inversió estudiades. ....	121
4.22: Configuració de L'EDAR en modalitat OPEN-LOOP. Programa West®. ....	123
4.23: Variació del consum energètic i les concentracions d'amoni i nitrats en l'efluent. ....	124
4.24: Arbre de decisió corresponent a l'estratègia de control de l'OD. ....	125
4.25: Representació de l'estratègia de control OD-V4 . Programa West®. ....	126
4.26: Representació de l'estratègia de control OD-NH-NO. Programa West®. ....	127

	Pàg.
4.27: OD_NH_NO control per diferents punts consigna d'amoni. ....	128
4.28: Arbre de control per a nitrats i amoni. ....	130
4.29: Representació de l'estratègia de control OD_NH_NO. Sensor a l'efluent. ....	132
4.30: Representació de l'estratègia de control PI. ....	134
4.31: Comportament del sistema de control per a l'estratègia PI amb adaptació en continuu dels set-points en funció del sistema tarifari. ....	140
4.32: Evolució de les estratègies aplicades a L'EDAR de la Vall del Ges. ....	141
4.33: Comparativa de costos i concentracions de N_NH4+ en l'efluent. Sistema open- loop i control PI amb adaptació en continu dels set-points d'amoni segons tarifes elèctriques. ....	142
 Apèndix	
AI.1: Relació de cabals a tractar (nocturn+puntes) utilitzant un tanc pulmó. ....	159
AI.2: Anàlisi de sensibilitat per a la variable TSS. ....	167
AI.3: Anàlisi de sensibilitat per a la variable OD. ....	171
AI.4: Anàlisi de sensibilitat per a la variable $\text{NH}_4^+$ . ....	175
AI.5: Anàlisi de sensibilitat per a la variable $\text{NO}_3^-$ . ....	179
AI.6: Sortida model per al calibratge en estat estacionari. ....	185



## LLISTAT DE TAULES

---

Capítol 1	Pàg.
1.1: Relació de consums elèctrics i costos d'aeració. ....	17
1.2: Relació de variables (controlades i manipulades) més utilitzades. ....	37
Capítol 3	
3.1: Característiques de disseny i condicions operacionals de l'EDAR de la Vall del Ges. ....	46
3.2: Variables d'estat del model ASM1. ....	52
3.3: Paràmetres per a la caracterització de l'influent. ....	53
3.4: Equacions aplicables al càlcul de les variables d'estat. ....	53
3.5: Notació matricial del creixement heterotròfic en medi aerobi. ....	54
3.6: Matriu de Petersen per al model biològic ASM1. ....	56
3.7: Relació de paràmetres modificats pel model ASM1. ....	58
3.8: Model de sedimentació. Paràmetres i valors per defecte. ....	60
3.9: Definició del càlcul de les variables compostes en el model ASM1. ....	60
3.10: Valors límit aplicats en el model ASM1. ....	61
3.11: Límits legislatius d'abocament de les EDAR en zones sensibles. ....	64
Capítol 4	
4.1: Paràmetres analítics i freqüències de mostreig a l'EDAR de la Vall del Ges. ....	78
4.2: Mitjanes mensuals de cabals i rendiments de depuració. Any 2009. ....	79
4.3: Característiques de l'influent a tractat a l'EDAR durant l'any 2009. ....	79
4.4: Paràmetres utilitzats per al càlcul del cabal de purga de fangs. ....	89
4.5: Relació de paràmetres per a la comprovació del TRC. ....	91
4.6: Paràmetres utilitzats per a la comprovació del TRC. ....	92
4.7: Valors del fraccionament per a l'estat estacionari. ....	94
4.8: Relació de paràmetres i variables de l'anàlisi de sensibilitat. ....	98
4.9: Relació de canvis efectuats sobre constants cinètiques en el calibratge en estat estacionari. ....	103
4.10: Taula comparativa del calibratge en estat estacionari. ....	104
4.11: Relació de canvis efectuats sobre constants cinètiques en el calibratge del model en estat dinàmic. ....	105

	Pàg.
4.12: Valors comparatius de sortida del model i els valors de planta. Simulació en dinàmic. ....	106
4.13: Relació del càlcul d'errors en el calibratge del model de planta. ....	107
4.14: Pressupost per al tanc d'emmagatzematge segons l'opció 1. Utilització de mòduls prefabricats. ....	113
4.15: Pressupost per al tanc d'emmagatzematge segons l'opció 1. Execució d'obra. ...	114
4.16: Pressupost total opció (1). Construcció i equipaments. ....	117
4.17: Relació de costos totals segons opció tanc emmagatzematge. Dipòsit aeri i construcció modular. ....	118
4.18: Relació de volums i costos aeració per opció1. ....	119
4.19: Càlcul del VAN i el PR per opció (1). Dipòsit aeri 590 m <sup>3</sup> . ....	120
4.20: Relació de valors VAN i PR per a les tres opcions presentades. ....	121
4.21: Resultats de la simulació en dinàmic. Modalitat <i>OPEN-LOOP</i> . ....	123
4.22: Comparació de resultats per a les estratègies <i>OPEN-LOOP</i> i l'estratègia de control d'OD. ....	126
4.23: Simulacions OD-NH-NO control per a diferents <i>set points</i> d'amoni. Influent. ....	129
4.24: Resultats de les simulacions DO-NH-NO control efluent. ....	131
4.25: Resultats de les simulacions OD_NH_NO control a biològic. ....	133
4.26: Resultats de les simulacions del control PI en cascada per diferents <i>set points</i> d'amoni. ....	135
4.27: Relació de períodes tarifaris utilitzats a l'EDAR durant l'any 2009. ....	136
4.28: Relació de la variació continuada dels diferents valors de <i>set points</i> segons període tarifari. ....	138
4.29: Resultats simulacions PI control amb <i>set -points</i> relacionats amb sistema tarifari. ....	139
4.30: Costos estimats per a la implementació d'un controlador PI amb sensors de nitrats i amoni. ....	143
4.31: Càlcul del VAN i PR per a l'estratègia de control PI amb adaptació en continu dels set-points en funció del sistema tarifari de l'EDAR. ....	144
 Apèndix	
Taula AI.1: Pressupost total opció 2. Construcció i equipaments. ....	160
Taula AI.2: Pressupost total opció 3. Construcció i equipaments. ....	161
	Pàg.

Taula AI.3: Relació de volums i costos d'aeració per opció 2. ....	162
Taula AI.4: Relació de volums i costos per opció 3. ....	163
Taula AI.5: Càlcul del VAN i del PR per opció 2: Dipòsit aeri. ....	164
Taula AI.6: Càlcul del VAN i del PR per opció 3: Dipòsit aeri. ....	165
Taula AI.7: Resultats del model per a la simulació en <i>open-loop</i> . ....	187
Taula AI.8: Resultats del model per a la simulació OD control. ....	188
Taula AI.9: Resultats del model per a la simulació OD-NH-NO amb els sensors ubicats en l'efluent. ....	189
Taula AI.10: Resultats del model per a la simulació OD-NH-NO amb els sensors ubicats en el biològic. ....	190
Taula AI.11: Resultats del model per a la simulacions utilitzant un sistema Pi en cascada i per a diferents punts de consigna. ....	191
Taula AI.12: Resultats del model per a la simulacions utilitzant un sistema Pi en cascada amb adaptació en continu dels set-points d'aroni segons sistema tarifari. ....	192



## RELACIÓ D'ACRÒNIMS

---

AE	Aeration Energy
ASM1	Activated Sludge Model nº 1
BSM1-LT	Biological Sludge Model nº 1 Long Term
DBO <sub>5</sub>	Demanda Biològica d'Oxigen en 5 dies
DQO sol	Demanda Química oxigen soluble
DQO	Demanda Química d'Oxigen
EBNi	Eliminació biològica de Nitrogen
ED	Estat dinàmic
EDAR	Estació Depuradora d'Aigües Residuals
EE	Estat Estacionari
EQI	Effluent Quality Index
h.-eq.	Habitants Equivalents
ICAEN	Institut Català de l'Energia
K <sub>L</sub> a	Coefficient global de transferència d'oxigen
MLSS	Sòlids en suspensió en el licor mescla
MO	Matèria Orgànica
N total	Nitrogen total
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Amoni
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Nitrats
NTK	Nitrogen Kjeldhal Total
OD	Oxigen Dissolt
ORP	Potencial d'Oxidació Reducció
P total	Fòsfor Total
P	Controlador d'acció proporcional
PEE	Pla d'Estalvi i Eficiència Energètica
PI	Controlador d'acció proporcional/integral
PID	Controlador d'acció proporcional /integral/derivatiu
SA	Sensitivity Analysis
SFA	Sensitivity Function Analysis
SFA	Sistema de fangs activats
T <sup>º</sup>	Temperatura
TSS	Sòlids en Suspensió Totals
VSS	Volatile Suspended Solids
WEST <sup>®</sup>	World Wide Engine for Simulation, Training and Automation





## INTRODUCCIÓ

---



# 1. INTRODUCCIÓ

---

## 1. INTRODUCCIÓ

L'aigua és vida, cap ésser viu és capaç de sobreviure en absència d'aquest element bàsic. Els nostres avantpassats l'hi donaven un ús de supervivència, comparat amb les aplicacions que se'n fan d'ella actualment. Junt amb el creixement poblacional es van generar noves exigències de consum i, de forma inherent a l'increment d'aquestes necessitats, va augmentar la degradació de la seva qualitat natural. Moltes de les activitats industrials de nova implantació, igual que les creades a mitjans i finals del darrer segle, es van trobar amb que la seva ubicació estava estretament lligada a la disponibilitat d'aquest bé comú. Per altra banda, les poblacions al voltant de les zones eminentment industrials es van veure també incrementades i, com a conseqüència, la demanda d'aigua per a usos domèstics. D'aquesta manera, el poder d'autodepuració que tenia el propi medi i que resultava suficient en èpoques molt llunyanes, es va veure compromès i totalment insuficient davant l'activitat antropogènica i el seu creixement. A principis del segle XX, Arden i Lockett (1914) van desenvolupar un sistema de depuració a partir de fangs activats i van demostrar l'increment de la biomassa quan aquesta, airejada, es trobava en contacte amb aigües residuals, amb el conseqüent consum de matèria orgànica. La tecnologia al voltant d'aquest tipus de depuració no va deixar d'augmentar fins a arribar als sistemes de depuració actuals. Però actualment, les exigències són cada vegada més restrictives i la pròpia instal·lació de depuració, considerada com a una activitat industrial, té grans reptes a assolir al llarg de les futures dècades (Poch, 1999).

Si ens centrem en els futurs reptes de les Estacions Depuradores d'Aigües Residuals (EDAR), aquestes es trobaran, cada vegada més, sotmeses a noves pressions i a exigències que tot i tenir-les actualment presents, seran cada vegada més manifestes. Els conceptes de rendiments i qualitats dels efluent s són termes que les estacions depuradores venen controlant des del moment de la seva posada en marxa, però la seva instal·lació és una infraestructura fixa i moltes vegades la seva capacitat de tractament no és fàcilment ampliable en funció dels increments de les demandes de servei. Per altra banda, els costos implícits a la seva activitat afecten l'anomenat cost real de l'aigua, repercutint en forma de cànon sobre l'aigua de consum. Per tant, el cost real serà un factor important a considerar, tant per als consumidors com per a la viabilitat econòmica de la pròpia activitat de depuració.

Simultàniament, la tecnologia ha avançat amb escreix per tal de facilitar el funcionament d'aquestes instal·lacions, tant en noves estratègies de depuració, (reactors de membrana, sistemes de pre-desnitricació i adaptació de nous sistemes de control), com en el desenvolupament de noves eines de suport a la decisió que puguin facilitar la tasca d'aquesta activitat.

# 1. INTRODUCCIÓ

## 1.1. ESTACIONS DEPURADORES D'AIGÜES RESIDUALS (EDAR)

Les estacions depuradores d'aigües residuals són instal·lacions destinades a l'eliminació de sòlids, matèria orgànica i nutrients presents en les aigües residuals. Les aigües residuals domèstiques contenen una relació C/N/P (Carboni/Nitrogen/Fòsfor) de 100/5/1 (Tchobanoglous et al., 2003), que resulta suficient per a les necessitats d'alimentació de la major part dels microorganismes capaços de degradar la matèria orgànica en poques hores, transformant la DBO (Demanda Bioquímica d'Oxigen) en biomassa. L'aeració en el reactor permet mantenir les condicions d'aerobiosi que regeix el procés i mantenir en suspensió la biomassa a fi de poder accedir a tot el volum de líquid a tractar.

La figura 1.1 mostra la configuració de les diferents etapes d'una planta depuradora convencional de fangs activats.

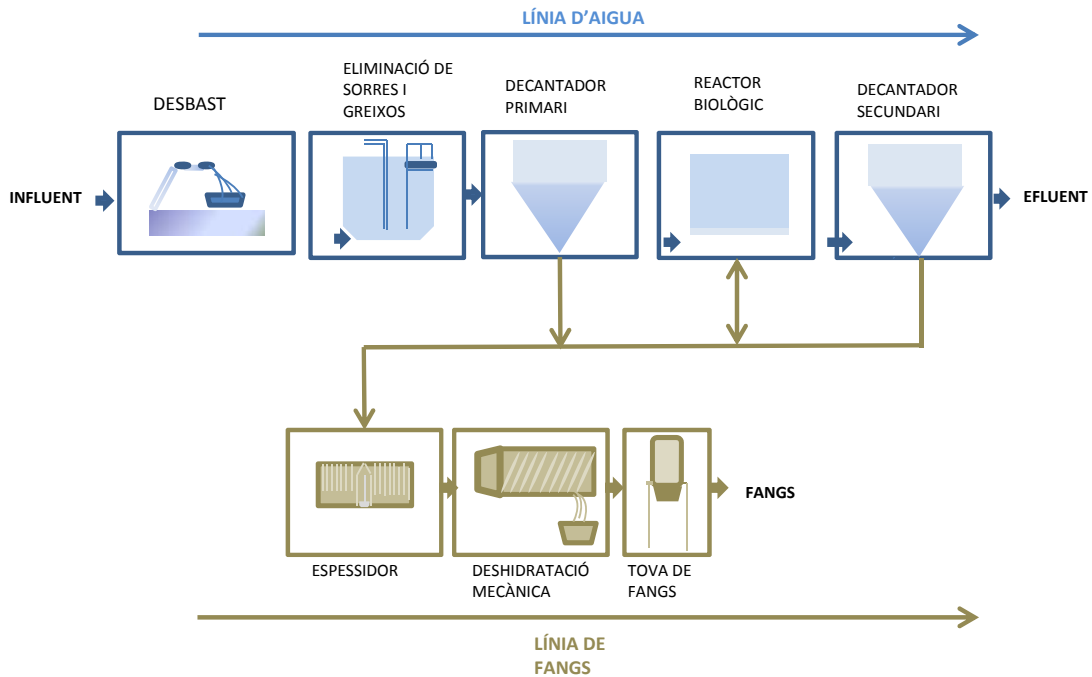


Figura 1.1: Esquema d'una estació depuradora de fangs activats.

La línia d'aigua està integrada pel pretractament, el tractament primari i el tractament secundari. El pretractament està format pel sistema de desbast on té lloc l'eliminació de gruixuts i fins, els canals d'eliminació de sorres i greixos i el decantador primari.

# 1. INTRODUCCIÓ

En aquesta primera etapa s'aconsegueix una disminució de sòlids sedimentables d'un 50-70% i de matèria orgànica d'un 25-40% (Glynn i Heinke, 1999). L'aigua així condicionada entra en el tractament primari on s'elimina, per acció de la biomassa, gairebé la totalitat de la matèria orgànica present. El licor de mescla obtingut és dirigit al decantador secundari on té lloc la sedimentació de la biomassa i l'obtenció del sobrenedant o efluent tractat. La producció de fangs provinent del fons del sedimentador secundari és repartida entre un percentatge de fangs que són recirculats en funció de la taxa aplicada i els excedents que són tractats a la línia de fangs. Aquesta línia generalment consta d'un espessidor per gravetat, d'on els sediments obtinguts d'aquesta etapa són sotmesos a l'addició de polielectròlits per tal d'afavorir la seva deshidratació, que generalment té lloc de forma mecànica. Els fangs amb el percentatge de sequedat desitjat són emmagatzemats a la tova de fangs per a la seva posterior gestió.

En general, els objectius principals dels sistema de fangs activats són:

1. L'oxidació de la matèria biodegradable en el tanc aerobi.
2. La sedimentació que permet la separació de quasi la totalitat de la biomassa de l'efluent tractat.

De forma sintetitzada, els sistemes de depuració per fangs activats (SFA) estan integrats pel reactor biològic i el sedimentador, tal com es representa a la figura 1.2.

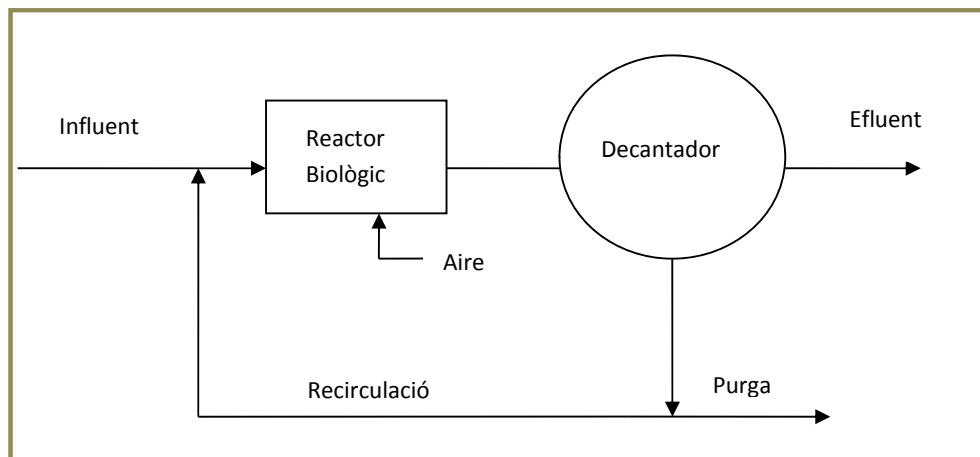


Figura 1.2: Esquema del procés de fangs activats.

Els SFA estan constituïts per un tractament aerobi que oxida la matèria orgànica, obtenint  $\text{CO}_2$ , aigua i nous microorganismes. L'aire necessari per al tractament és proporcionat mitjançant difusió o per aeració mecànica. Durant el tractament els

# 1. INTRODUCCIÓ

microorganismes formen flocs que, posteriorment, sedimenten en un tanc denominat clarificador o sedimentador. El sistema bàsic està comprès per un tanc d'aeració, un tanc de clarificació i un corrent de recirculació de la biomassa activa.

## 1.1.1. ELIMINACIÓ BIOLÒGICA DEL NITROGEN

No tots els sistemes de fangs activats estan destinats només a l'eliminació biològica del carboni, sinó que existeixen altres configuracions de planta basades en l'acció dels fangs activats i que tenen per finalitat, a part de l'eliminació del carboni, l'eliminació biològica dels nutrients: el nitrogen i el fòsfor. La major part del nitrogen present en l'aigua residual es troba en forma de nitrogen amoniacal (70-85%) i de nitrogen orgànic en menor proporció (Ramalho, 1996). En l'eliminació biològica del nitrogen es distingeixen dues etapes ben diferenciades: la nitrificació i la desnitrificació. A l'etapa de nitrificació, el nitrogen amoniacal, sota l'acció dels microorganismes autòtrofs (amoni-oxidants) és oxidat a nitrits i posteriorment a nitrats per acció dels nitrits oxidants. Els microorganismes autòtrofs són aquells microorganismes aerobis que tenen la capacitat d'utilitzar carboni de procedència inorgànica ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , carburs i sulfurs de carboni) per a la producció d'energia i síntesi cel·lular. L'energia la poden obtenir o bé de la llum (fotosintètics) o bé per reaccions d'oxidació-reducció (quimiosintètics). La figura 1.3 representa un esquema del metabolisme bacterià per aquesta darrera classificació.

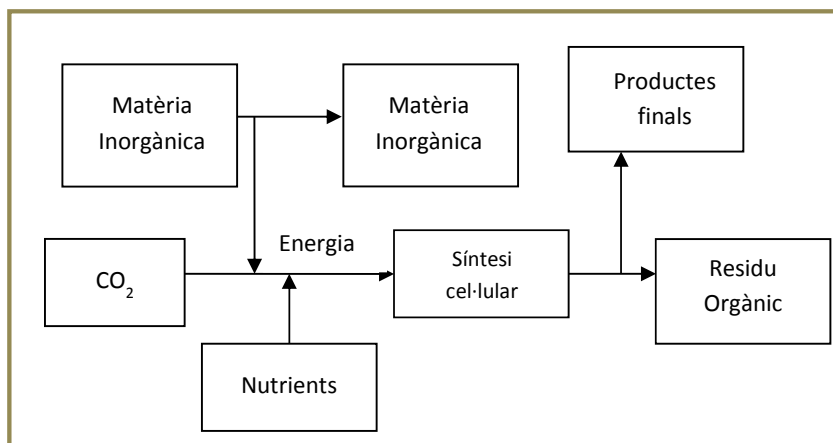


Figura 1.3: Representació esquemàtica del metabolisme bacterià autòtrof quimiosintètic (Ferrer i Seco, 2003).

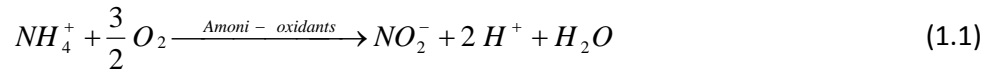
# 1. INTRODUCCIÓ

---

La desaparició de microorganismes autòtrofs per mort i lisi cel·lular dóna lloc a l'aparició en la dissolució de substrat lentament biodegradable, que és hidrolitzat i consumit pels microorganismes heteròtrofs, generant els productes finals.

El mecanisme de la nitrificació té lloc en dues fases representades per les equacions bioquímiques següents:

1ª fase



2ª fase

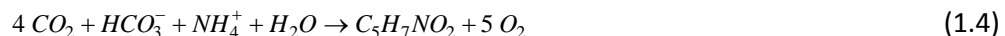


Reacció global

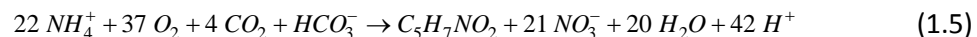


La desnitrificació té lloc gràcies a l'acció dels microorganismes heteròtrofs facultatius que són els que, a partir del seu creixement anòxic, redueixen els nitrats a nitrits i els nitrits a nitrogen molecular, amb consum de carboni procedent de matèria orgànica. Aquests microorganismes utilitzen l'oxigen dels nitrits/nitrats en els processos de respiració i per tant són capaços d'eliminar el nitrogen en condicions anòxiques (Bouzas et al., 2007).

Part del nitrogen en forma amoniaca és assimilada en el teixit cel·lular d'aquests microorganismes autòtrofs. La reacció de síntesi representativa d'aquesta assimilació autòtrofa és:



La reacció global del procés de conversió autòtrofa de l'ió amoni quedaria representada per:



Tal com es pot deduir de l'equació 1.5, durant el procés de nitrificació de l'amoni té lloc un increment de l'acidesa. Per tant l'alcalinitat del medi disminueix.

Els microorganismes heteròtrofs són els que actuen bàsicament en els sistemes de depuració biològica, tant en medis aerobis com anòxics. La figura 1.4 representa un esquema de les transformacions a què és sotmesa la matèria orgànica per acció d'aquests microorganismes.



# 1. INTRODUCCIÓ

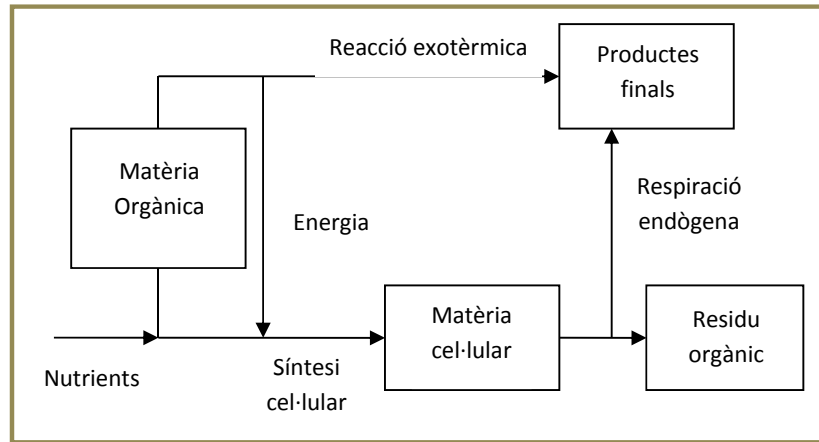


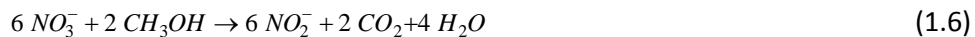
Figura 1.4: Representació esquemàtica del metabolisme bacterià heteròtrof (Ferrer i Seco, 2003).

Tant en condicions aeròbies com anòxiques, aquests microorganismes sotmeten la matèria orgànica a dues transformacions diferents: la primera és l'oxidació a  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  i altres compostos i com a resultat d'aquesta primera etapa, té lloc la segona en què l'energia obtinguda en l'oxidació prèvia és utilitzada per sintetitzar nou teixit cel·lular.

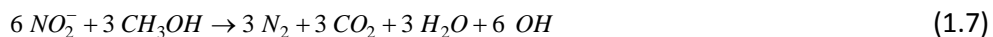
La major part dels bacteris capaços de reduir el nitrat, utilitzant el seu oxigen combinat com a acceptor d'electrons, són heteròtrofs facultatius. La utilització d'oxigen molecular es veu afavorida en front de la utilització del combinat. Com a conseqüència, en cas d'existir les dues formes, no es produiria la desnitrificació.

La desnitrificació per part dels microorganismes heteròtrofs facultatius, utilitzant com a exemple de matèria orgànica degradada el metanol, tindria lloc segons les fases següents:

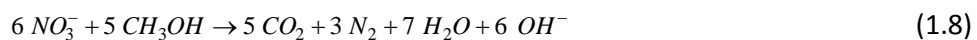
1<sup>a</sup> fase:



2<sup>a</sup> fase:



Reacció global:



De la reacció global s'observa que el fenomen de desnitrificació dona lloc a un increment d'alcalinitat del medi.

# 1. INTRODUCCIÓ

## 1.1.2. CONFIGURACIONS EBNI

Les EDAR que eliminen matèria orgànica (MO) i nitrogen poden presentar múltiples configuracions (EBNi), considerant que la hidròlisi del nitrogen orgànic d'origen té lloc de manera ràpida i arriba a la planta en forma d'amoni. Aquestes configuracions es classifiquen en dos grups, en funció de la situació de la zona anòxica respecte de la aeròbia (Balaguer et al., 2007):

### 1. Configuracions pre- anòxiques :

En aquest tipus de configuracions l'entrada de l'influent i les recirculacions tenen lloc en la zona anòxica.

Formen part d'aquest tipus:

- *Ludzack-Ettinger*:

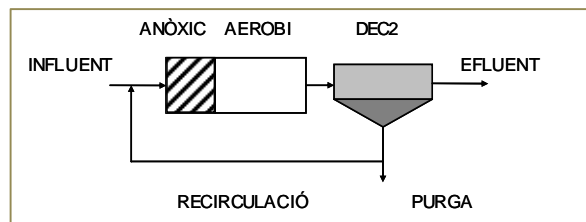


Figura 1.5: Esquema de configuració *Ludzack-Ettinger*.

En aquest tipus de configuració l'influent és introduït prèviament a la zona anòxica abans de passar a la zona aeròbia i el nitrat produït en aquesta zona és retornat a la zona anòxica mitjançant la recirculació externa. En ser l'única font de nitrat de la zona anòxica, la desnitrificació depèn d'aquest cabal.

- *Ludzack-Ettinger* modificada.

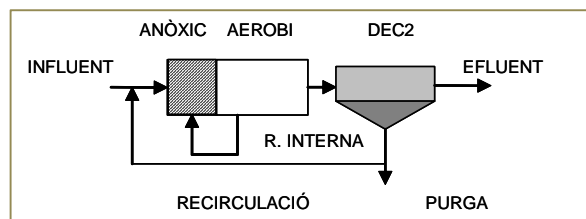


Figura 1.6: Esquema de configuració *Ludzack-Ettinger* modificada.

# 1. INTRODUCCIÓ

Una de les configuracions més utilitzades per eliminar nitrogen és la de *Ludzak-Ettinger* modificada. Consta d'una recirculació interna per incrementar la font de nitrats a la zona anòxica, aconseguint així un augment de la taxa de desnitrificació.

- Carroussel:

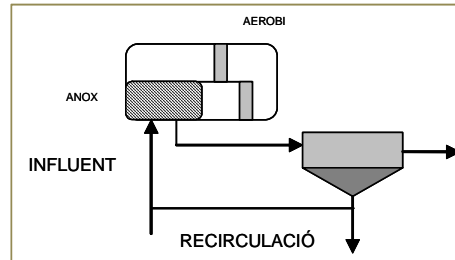


Figura 1.7: Esquema de configuració en carroussel.

Aquesta configuració està basada en la circulació de forma mecànica de l'aigua residual dins d'un reactor en forma oval. És una configuració fàcilment adaptable per aconseguir l'oxidació del carboni i la desnitrificació, sempre que les zones airejades siguin prou distants per crear zones anòxiques.

- d'Alimentació esglaonada:

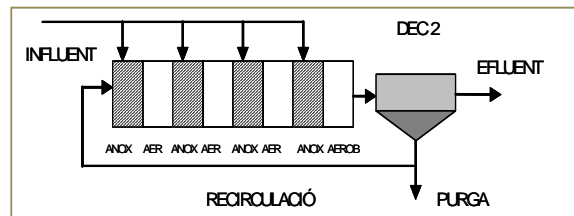


Figura 1.8: Esquema de configuració d'alimentació esglaonada.

En aquest cas, l'aigua residual es distribueix en les diferents zones anòxiques del procés, aplicant una distribució del mateix amb diferents proporcions (generalment 15:35:30:20), essent la darrera fracció una de les més importants, ja que determina la concentració de nitrats a l'efluent.

## 1. Configuracions post- anòxiques:

La zona anòxica es troba ubicada després de la zona aeròbia, formant part d'aquest grup les plantes *Wuhrmann*, *Bardenpho*, Doble etapa, *SBR* (Reactors Discontinus Seqüencials), *Nitrox* i *Orbal*<sup>TM</sup>.

# 1. INTRODUCCIÓ

- *Wuhrmann:*

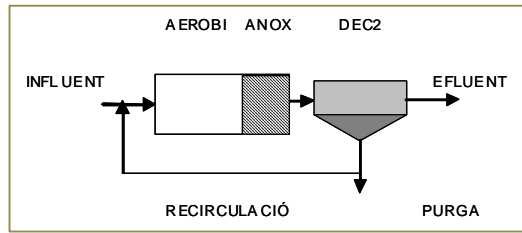


Figura 1.9: Esquema de configuració Wuhrmann.

L'influent és introduït conjuntament amb la recirculació externa en la zona aeròbia on té lloc la nitrificació i una segona etapa anòxica on es produeix la desnitrificació.

- *Bardenpho:*

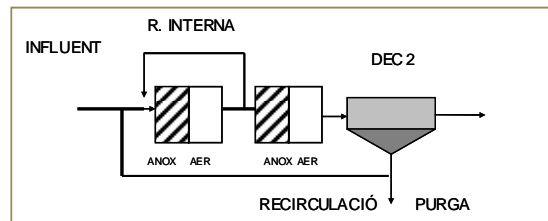


Figura 1.10: Esquema de configuració Bardenpho.

Està integrada per dues zones anòxiques i dues aeròbies amb recirculació del licor de mescla des de la primera zona aeròbia a la primera zona anòxica. D'aquesta manera s'intenta eliminar quasi en la seva totalitat el nitrogen, la qual cosa no es pot aconseguir en les configuracions anteriors.

- De doble etapa:

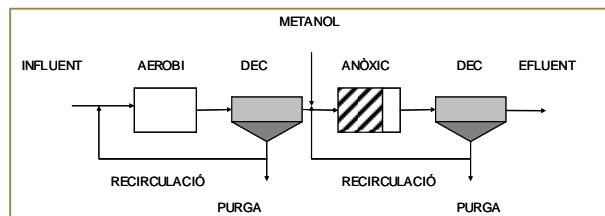


Figura 1.11: Esquema de configuració de doble etapa.

# 1. INTRODUCCIÓ

En aquesta configuració, la biomassa nitrificant i desnitrificant es troben separades en els dos decantadors. En el primer tanc té lloc la nitrificació de l'amoni i l'oxidació de la matèria orgànica, mentre que en el segon, on es produeix la desnitrificació, precisa d'una addició de carboni extern.

- *SBR* (Reactors Discontinus Seqüencials):

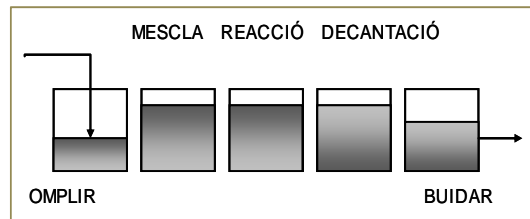


Figura 1.12: Esquema de configuració *SBR*.

Aquesta tecnologia es basa en un sistema de treball per cicles (ompliment, temps de retenció i buidatge), en un sol reactor, mantenint el control del temps de retenció, el nivell d'aigua al tanc i la concentració d'oxigen.

*Nitrox*:

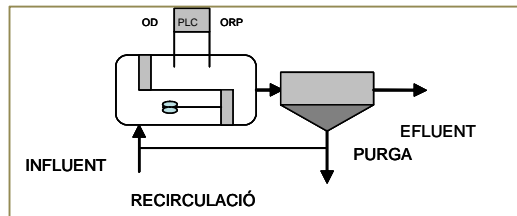


Figura 1.13: Esquema de configuració *Nitrox*.

Aquest procés és una variació del carroussel d'oxidació, però amb la particularitat de que el procés depèn del potencial d'oxidació i reducció (ORP), que és controlat al final de la desnitrificació i al principi de l'aeració, assolint molt bons resultats respecte de la desnitrificació.

# 1. INTRODUCCIÓ

Orbal™:

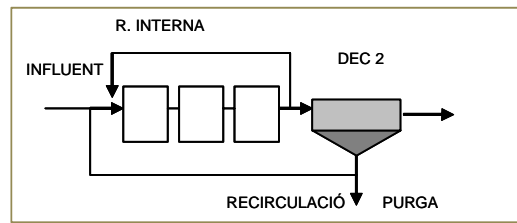


Figura 1.14: Esquema de configuració Orbal™.

En aquestes estacions depuradores les possibilitats de nitrificació/desnitrificació són tantes com les diferents combinacions que ofereixen els canals. Per tant, aquests sistemes poden treballar tant amb configuració pre-anòxica com post-anòxica. També permeten l'eliminació biològica del fòsfor i, si les exigències en la seva eliminació són molt elevades, es poden efectuar precipitacions del mateix, utilitzant sals de ferro ( $\text{FeCl}_3$ ), ubicant un dosificador del producte en el canal intern.

## 1.1.2.1. ANÀLISI DEL SISTEMA ORBAL™ COM A PROCÉS D'ELIMINACIÓ BIOLÒGICA DE NITROGEN I FÒSFOR

El sistema Orbal™ és una configuració modificada de fangs activats, format per tres canals d'oxidació treballant en la modalitat d'aeració perllongada, sense necessitat de sedimentació primària ni estabilització posterior de fangs. Simultàniament a l'eliminació de matèria orgànica, el mateix procés permet la nitrificació/desnitrificació, l'eliminació de fòsfor i l'estabilització de fangs. El sistema es presenta com un reactor múltiple (integrat per diversos reactors), en forma de canal que treballen en sèrie, permetent aportacions d'oxigen independents a cada zona. En general aquestes configuracions solen operar utilitzant el canal extern com a zona anòxica (0 ppm d' $\text{O}_2$ ), amb baixa aportació d'oxigen en el canal intermedi (de l'ordre d'1 ppm) i més elevada en el canal intern (al voltant de 2 ppm). La possibilitat de treballar amb tres reactors independents confereix al sistema, comparativament amb d'altres configuracions (i.e. les que consten d'un sol reactor), una major flexibilitat i una eficiència de depuració més elevada.

Els canals es comuniquen per orificis interns i l'influent entra en el procés de tractament pel canal extern, passant a l'intermedi i finalment a l'intern.

L'aportació d'oxigen es realitza mitjançant discos rotatoris o "rotors" ubicats sobre un eix horitzontal i governats per un motor que pot treballar a diferents velocitats (rpm). La configuració d'aquests rotors afavoreix la dispersió entre els dos medis (aire/aigua). La regulació d'aquesta aportació s'efectua mitjançant la variació del nivell

# 1. INTRODUCCIÓ

---

d'efondrament dels propis discos, la velocitat de treball del motor, la variació del seu nombre, o bé la variació del sentit de gir. Les plantes Orbal™ es presenten com un sistema econòmic d'eliminació de MO i nitrogen degut :

1. A la possibilitat de reaprofitament de l'oxigen aportat en la nitrificació.
2. A la regulació de les diferents concentracions d'OD en cadascun dels canals.
3. A que el sistema d'aportació d'aire per rotors presenta un nivell de transferència superior al de les turbines i dels difusors.

Les possibilitats de nitrificació/desnitrificació són tantes com les diferents combinacions que ofereixen el canals. Per tant, aquests sistemes poden treballar tant amb una configuració pre-anòxica com post-anòxica. També permeten l'eliminació biològica del fòsfor i, si les exigències en la seva eliminació són molt elevades, es poden efectuar precipitacions utilitzant sals de ferro ( $\text{FeCl}_3$ ), simplement ubicant un dosificador del producte en el canal intern.

Molt pocs són els autors que han treballats sobre aquest tipus de sistemes de tractament d'aigües residuals. Així doncs tot i ser un tipus de planta dissenyada l'any 1959, es troba una primera referència (Drew i Greeff, 1973), basada en un estudi sobre l'eliminació de nitrogen mitjançant canvis de les condicions aeròbies i anòxiques en aquest tipus de planta. Estudis més actuals (Burrows et al., 2001) treballen sobre l'anàlisi del nivell de mescla en els canals Orbal mitjançant l'ús de traçadors. Més recentment, (Insel et al., 2003) van estudiar l'eliminació de nutrients utilitzant el model ASM2d sobre aquest sistema de depuració.

## 1.2. ESTAT ACTUAL DELS SISTEMES DE SANEJAMENT A CATALUNYA

Segons l'Agència Catalana de l'Aigua (ACA, 2013), Catalunya disposa actualment d'un total de 411 EDAR en servei, que varen ser construïdes segons els diferents Programes de Sanejament d'Aigües Residuals Urbanes (PSARU del 2000 al 2012). Abans de 1990, se n'havien construït 51, entre la dècada de 1990 a 2000 se'n varen construir i posar en marxa 186, durant la dècada compresa entre l'any 2000 i 2010, 148 i després del 2010, 26. D'aquesta manera es pretenia cobrir les necessitats del territori en matèria de sanejament, seguint la Directiva 91/271. La figura 1.15 mostra la distribució dels abocaments de la totalitat de les EDAR existents actualment a Catalunya, la majoria de les quals pertanyen a la qualificació de zones sensibles o zones que, segons criteris de la Directiva 91/271, són:

- (1) Medis aquàtics d'aigua dolça (llacs naturals, estuaris i aigües costaneres), que siguin eutròfics o amb risc potencial d'eutrofització, així com estuaris i badies amb poc intercanvi d'aigua o que rebien gran quantitat de nutrients.

# 1. INTRODUCCIÓ

En aquests casos la Directiva preveu l'eliminació de nitrogen i fòsfor quan són receptors d'abocaments procedents de grans aglomeracions urbanes.

(2) Aigües dolces superficials destinades a l'obtenció d'aigua potable amb concentració de nitrats superior al que estableixen les disposicions de la Directiva 75/440/CEE.

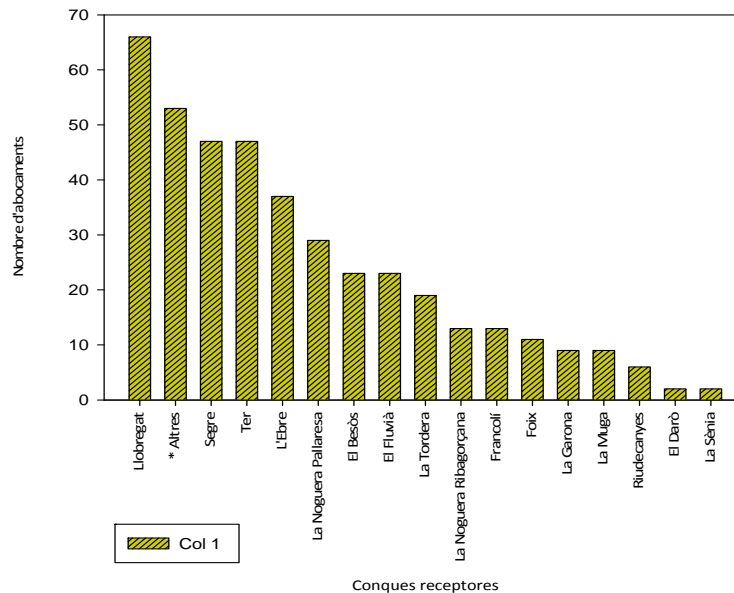


Figura 1.15: Distribució dels abocaments a les diferents conques receptors de les EDAR catalanes.

\*L'apartat "altres" correspon a abocaments dels efluent a rieres costaneres, rierols, torrents i emissaris submarins a la Mediterrània.

Caldria remarcar que del total de plantes en servei, 57 han estat sotmeses a ampliació o remodelació a fi d'adaptar-les a les noves necessitats. La majoria d'elles corresponen al període de construcció comprès entre 1990 i 2000.

Quant al tipus de tractaments de què aquestes disposen, 328 treballen amb sistemes de fangs activats i 83 estan constituïdes per tractaments tous, amb la distribució següent: 39,8 % llacunatges, 25,3 % biodiscos, 7,2 % primari o pre-tractaments, 8,4 % sistemes de doble etapa i 19,3% filtres percoladors.



# 1. INTRODUCCIÓ

El grup d'EDAR que basen el seu tractament en fangs activats (un total de 328), presenten la distribució, en percentatges segons l'eliminació de contaminants, representada a la figura 1.16.

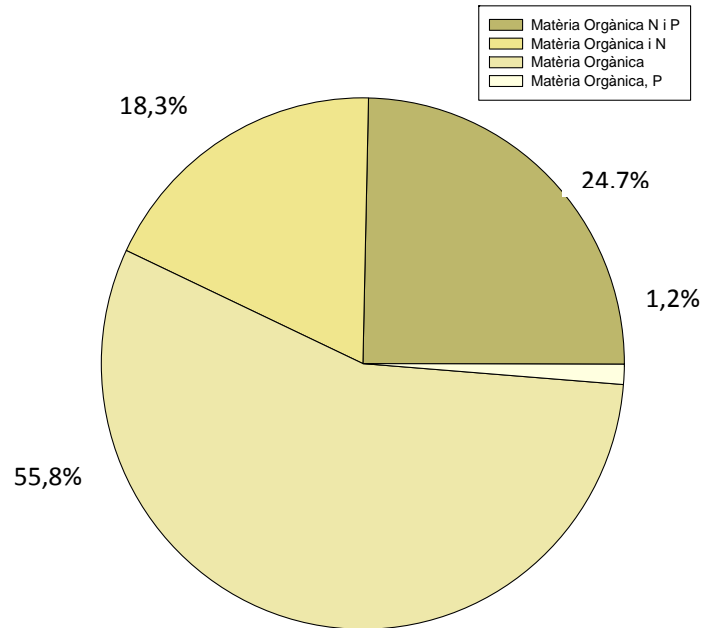


Figura 1.16: Distribució dels tractaments addicionals en les EDAR de fangs activats.

L'EDAR de La Vall del Ges pertany al primer grup d'eliminació de matèria orgànica, nitrogen i fòsfor.

De la figura 1.16, se'n desprèn que un percentatge molt elevat de les EDAR que treballen amb fangs activats només eliminen matèria orgànica, essent la seva distribució respecte a la capacitat de tractament segons els h-eq. de disseny, la que es presenta a la figura 1.17.

# 1. INTRODUCCIÓ

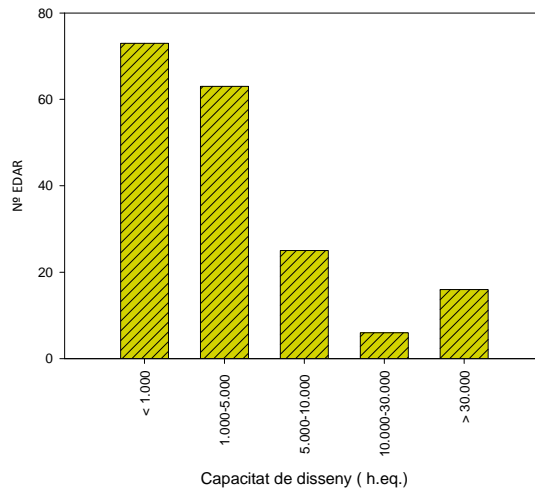


Figura 1.17: Distribució per capacitats de les EDAR amb eliminació de matèria orgànica.

Tot i que la majoria d'EDAR que només eliminen matèria orgànica tenen la seva capacitat de tractament compresa entre 1000 i 5000 h-eq., la resta (un 26%) que presenten capacitats de disseny superiors continuen aportant nutrients al medi receptor i per tant podrien adaptar-se o transformar-se en configuracions EBNi.

## 1.3. EL VINCLE AIGUA-ENERGIA

Olsson (2011) afirma que la problemàtica de l'aigua i de l'energia està estretament relacionada, ja que l'energia és necessària per a la gestió de l'aigua i l'aigua essencial per a la producció d'energia, i que sobre una base global, ni l'aigua ni l'energia són escassos, el que sí és limitant, en el cas de l'aigua, és la seva disponibilitat i els costos que aquesta comporta. En alguns països europeus ja s'ha manifestat l'exigència de disminuir el cost energètic en el tractament de les seves aigües residuals. En aquest sentit, el Pla d'Aigües de Califòrnia (actualització del 2009) planteja un augment d'un 20% de l'eficiència energètica en el tractament de les seves residuals i a Suècia un nou programa d'estalvi d'energia enfoca el seu objectiu en la reducció d'un 20-30% sobre el consum energètic en les operacions de tractament d'aigües residuals.

A Espanya es depuren 3000 hm<sup>3</sup>/any d'aigües residuals urbanes, amb una exigència de 305 MW, la qual cosa equival a una mitjana de 5,6 W/h.eq. o el que correspondria a 0,67 kWh/m<sup>3</sup>. En aquest sentit, el Ministeri d'Indústria, Turisme i Comerç ha presentat el "Plan de acción de ahorro y eficiencia energética 2011-2020". Dins dels seus continguts principals s'hi troba la millora de l'eficiència energètica de les instal·lacions actuals de depuració d'aigües residuals (mòdul4), presentant com a objectiu el foment de la substitució de tecnologies existents per d'altres de més eficients. Els mecanismes d'actuació previstos estan, en part, basats en incentius econòmics, amb la col·laboració

# 1. INTRODUCCIÓ

---

de les Comunitats Autònomes i les Administracions Locals. Per la seva part, Catalunya en l'Acord de Govern GOV/104/2007 de 24 d'abril va aprovar el Programa d'Estalvi i Eficiència Energètica (PEEE), assignant com a responsable en el àmbit de sanejament a l'Agència Catalana de l'Aigua. L'aplicació d'aquest programa abasta les instal·lacions de sanejament que presenten un consum elèctric anual superior a 200000 kWh. Així doncs, en la Memòria 2011 del departament de Territori i Sostenibilitat (Agència Catalana de l'Aigua) es preveu, amb l'aplicació d'aquest Pla, un estalvi d'un 10% de l'energia consumida a les depuradores catalanes i quantificada en més de 3 milions d'euros anuals. Per altra banda, l'ICAEN (Institut Català de l'Energia), dins del programa marc de l'Estratègia d'Estalvi i eficiència Energètica definit en el Pla de l'Energia a Catalunya 2006-2015, acorda que les instal·lacions actuals de sanejament poden acollir-se als ajuts per a la millora de l'eficiència energètica, fomentant diversos objectius, entre els quals s'hi troba el control del nivell d'oxigen en l'etapa d'aeració.

Com a conseqüència d'aquests programes el sector de les aigües residuals podrien beneficiar-se d'avenços tecnològics, ja que mitjançant el control automàtic de l'oxigen dissolt ajustat segons les càrregues variables que presenten generalment els seus influents, és possible arribar a un estalvi energètic sense disminuir l'eficiència de l'activitat biològica. En aquest sentit, el control i l'automatització de les EDAR es presenta com una solució sostenible, no només des d'un punt de vista individual, sinó com un sistema amb solucions integrades.

## 1.3.1. CONSUM ENERGÈTIC A L'EDAR DE LA VALL DEL GES

L'EDAR de la Vall del Ges pertany al grup de plantes amb consums anuals superiors als 200000 kWh. Un seguiment de consum elèctric corresponent a l'any 2009 indica un consum total de 1199585 kWh. La distribució del seu consum energètic s'estima segons els següents percentatges :

- Pous de bombes i desbast = 30 %
- Deshidratació de fangs = 15 %
- Reactor biològic = 55 %

La figura 1.18 mostra aquesta distribució on els sistemes d'aeració representen el consum majoritari.

# 1. INTRODUCCIÓ

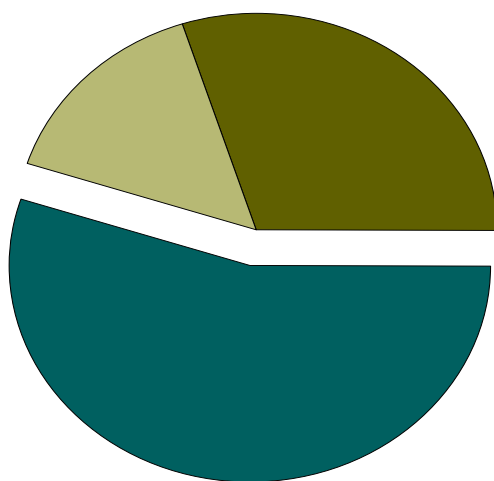
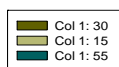


Figura 1.18: Distribució del consum elèctric a l'EDAR de la Vall del Ges durant l'any 2009.

La taula 1.1 relaciona el consum elèctric global per m<sup>3</sup> tractat, el consum per aeració i el cost per m<sup>3</sup> airejat.

Taula 1.1: Relació de consums elèctrics i costos d'aeració.

Mes	kWh totals consumits	m <sup>3</sup> /mes tractats	Consum Energia total kWh/m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup> aeració	€/mes facturats	Aeració €/m <sup>3</sup>
Gener	91168	159126	0,57	0,34	12146	0,042
Febrer	82752	144389	0,57	0,34	11144	0,042
Març	99999	148151	0,67	0,40	13323	0,049
Abril	114320	163186	0,70	0,42	15166	0,051
Maig	101878	147775	0,69	0,41	13128	0,049
Juny	101111	135475	0,75	0,45	13619	0,055
Juliol	104166	145508	0,72	0,43	15330	0,058
Agost	103468	108278	0,96	0,57	13168	0,067
Setembre	99294	132509	0,75	0,45	14137	0,059
Octubre	94575	120786	0,78	0,47	13082	0,059
Novembre	104434	132509	0,79	0,47	15013	0,062
Desembre	102420	135432	0,76	0,45	14578	0,059

\* Els càlculs inclouen els costos fixes derivats del consum elèctric.

# 1. INTRODUCCIÓ

---

A la taula 1.1 es pot observar que la relació de kWh consumits per m<sup>3</sup> tractat, tendeix a incrementar-se durant els mesos d'estiu (Juny, Juliol, Agost) i els mesos en que es detecta més aportació pluviomètrica (Abril, Maig, Novembre i Desembre). El consum de l'aeració segueix lògicament, la mateixa dinàmica. Per altra banda si es compara el consum mitjà del tractament estimat a Espanya en uns 0,67 kWh/m<sup>3</sup> tractat (veure apartat 1.3), es pot comprovar que en aquesta planta el 75% del temps d'operació supera aquest valor. De forma proporcional, i per l'aeració, aplicant la distribució del 55% sobre el cost total, li correspondria un cost de 0,37kWh/m<sup>3</sup> per aquesta operació, per tant el consum de l'aeració també superaria amb el mateix percentatge el valor mig estimat per l'aportació d'oxigen Tot i considerar-se un tipus de planta que ofereix certs avantatges respecte del consum energètic, amb aquests valors presentats, es comprova que els seus consums són lleugerament superiors a les mitjanes de consum.

Per altra banda i vist el consum total anual d'energia, aquesta planta podria acollir-se al Programa d'Estalvi i Eficiència Energètica per tal d'optimitzar el consum elèctric de l'aeració, que representa un elevat percentatge respecte del cost total.

## 1.4. ESTRUCTURES BÀSIQUES DE CONTROL

El control de les variables dels processos d'una EDAR es realitza generalment mitjançant l'ajustament de les condicions d'operació (recirculació de cabals, aeració, etc.) a través d'una sèrie de variables anomenades variables manipulades. Però el control d'operació d'un sistema de fangs activats resulta molt més complex ja que la planta està sotmesa a pertorbacions i per altra banda existeix la dificultat d'efectuar un seguiment continuat de totes les variables que permetin un coneixement total del desenvolupament del procés. Per tal de pal·liar les dificultats en la selecció d'un òptim sistema de control, es fa necessari adoptar una bona metodologia i un bon disseny de control.

En el disseny d'un sistema de control cal plantejar prèviament els objectius que es desitgen assolir. Es presenten tres necessitats bàsiques que qualsevol sistema de control hauria de complir:

- Minimitzar o eliminar les pertorbacions externes.
- Mantenir el procés estabilitzat.
- Optimitzar el rendiment del procés a controlar.

A fi d'assolir aquestes necessitats bàsiques, és possible adoptar diferents metodologies de control, (Stephanopoulos, 1984), que es resumeixen a continuació.

# 1. INTRODUCCIÓ

- Control en llaç obert (*open-loop*):

És aquell control que porta a terme l'operari de forma manual. En aquest tipus de control no existeix 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 corresponent sobre la variable manipulada.

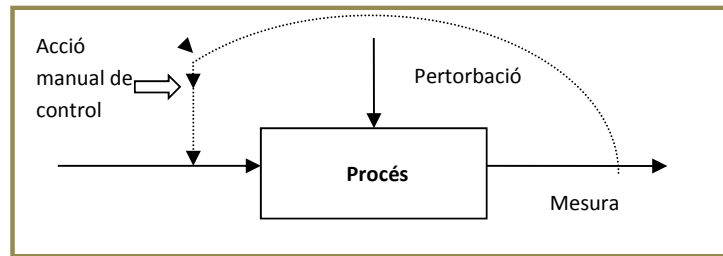


Figura 1.19: Esquema de control en llaç obert.

- Control per retroalimentació (*feedback*):

Està basat en la mesura mitjançant un sensor en continu de la variable controlada a fi de comparar en tot moment els valors obtinguts amb el valor de consigna preestablert per l'operador del sistema (valor amb què es vol treballar). A partir de l'error existent entre el valor desitjat i el mesurat, el controlador fixa l'actuació adequada, a través de la modificació de la variable manipulada. 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. Per tant, l'acció de control per retroalimentació segueix les etapes següents:

1. Mesura el valor de la variable controlada a la sortida del procés mitjançant un dispositiu de mesura adequat.
2. El nus de comparació del controlador compara aquest valor mesurat amb el valor desitjat o de referència i en calcula l'error ( $\xi$ ) o diferència entre els dos valors.
3. El controlador mitjançant l'element final de control, varia el valor de la variable manipulada de manera que es redueixi la magnitud de la desviació ( $\xi$ ).

Les configuracions de control per retroalimentació basen les accions de control exclusivament en mesures de la variable que s'està controlant.

# 1. INTRODUCCIÓ

Es proporciona un punt de consigna a la variable controlada i el controlador canvia la variable manipulada fins que el valor trobat dóna el valor desitjat per la variable controlada. L'actuació sobre el procés per compensar l'efecte de les variables de pertorbació (l'acció correctora) sol basar-se en el error, és a dir, la diferència observada entre el valor mesurat de la variable a controlar i el valor desitjat o punt de consigna.

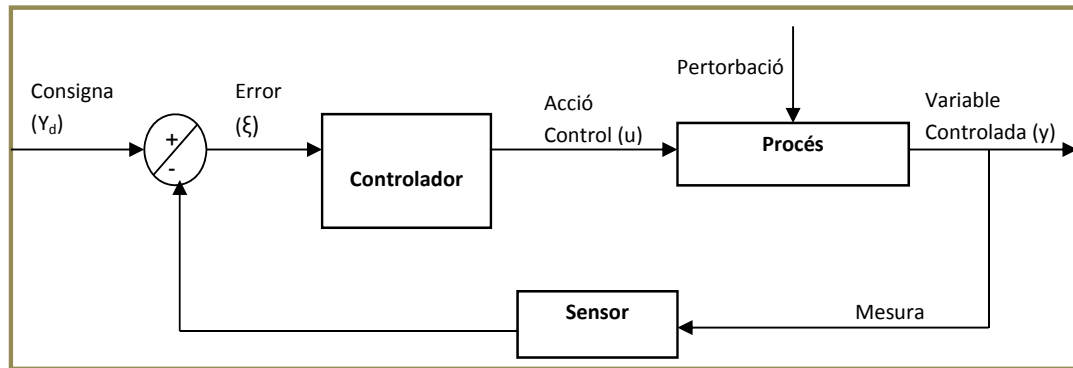


Figura 1.20: Esquema de control per retroalimentació (*feedback*).

Les limitacions de les configuracions de control per retroalimentació són degudes a que totes les accions de control es realitzen després de que el procés es vegi afectat per alguna pertorbació. Quan el valor d'alguna pertorbació varia no es realitza cap acció de control fins que la variable controlada es desvia del valor objectiu.

Una millora d'aquesta metodologia és el control en cascada, que estableix dos llaços: un d'exterior que varia el valor de consigna i un d'interior que ajusta la diferència entre el valor mesurat i el valor desitjat.

- Control anticipatiu (*feedforward*):

Mentre que el control per retroalimentació només actua quan s'ha produït una desviació del valor de la variable controlada respecte dels valor de consigna, el control anticipatiu intenta actuar abans que es produeixi la pertorbació que allunya al sistema de les condicions desitjades. Per tant el control anticipatiu analitza la pertorbació abans de que entri al procés a controlar i en determina l'acció de control necessària per tal de minimitzar el seu efecte. La dificultat de disposar de models eficients que permetin 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

# 1. INTRODUCCIÓ

llaç de regulació per retroalimentació que permeti en tot moment conèixer i ajustar les desviacions de la variable controlada.

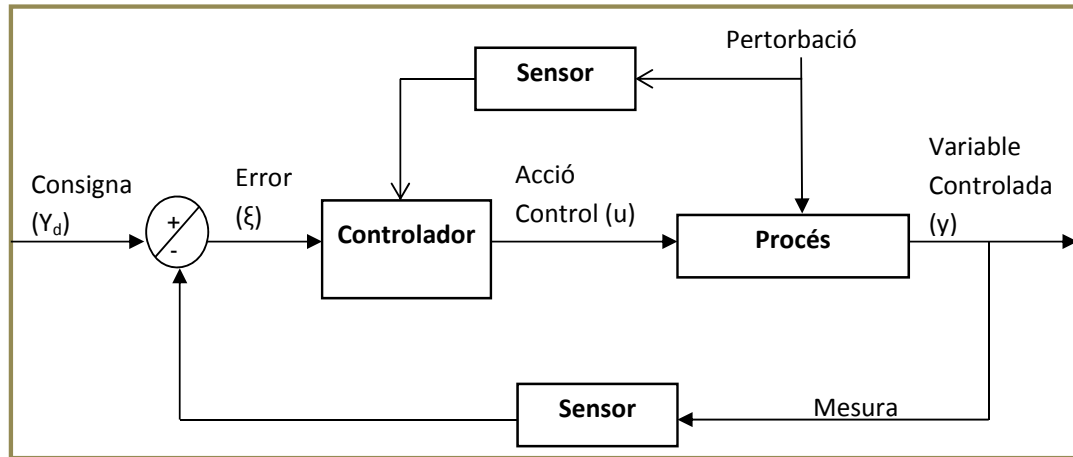


Figura 1.21: Esquema d'un control anticipatiu amb un laç de retroalimentació acoblat.

- Control adaptatiu: Aquest tipus de control consisteix bàsicament en un estimador de paràmetres i un algoritme de control. La figura 1.22 correspon a l'esquema d'aquest tipus de control.

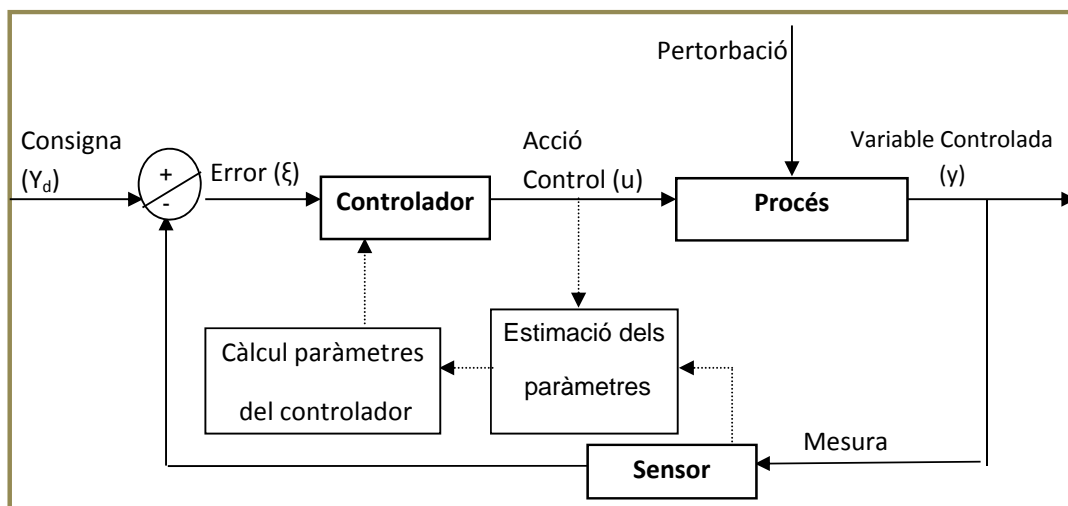


Figura 1.22: Esquema de control adaptatiu.



# 1. INTRODUCCIÓ

---

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

Existeixen tres tipus d'accions o modes de control que es poden utilitzar en diverses combinacions (Åström, 1997), així doncs es pot parlar de controladors d'una sola acció ((P) proporcional, (I) integral, (D) derivatiu), de dues accions (PI) proporcional e integral, PD proporcional derivatiu, o bé de tres accions (PID) proporcional integral derivatiu. (Luyben i Luyben, 2002).

En un controlador d'acció proporcional e integral, en el cas de presentar-se una pertorbació en el sistema controlat, es combinen les dues accions. L'acció proporcional actua instantàniament mentre que la integral actua sobre un interval de temps. La resposta del control PI respon a l'equació:

$$y(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (1.9)$$

Que també pot expressar-se com:

$$y(t) = K_p \varepsilon(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (1.10)$$

On:

$K_p$  és el guany proporcional que determina la sensibilitat del controlador i

$T_i$  el temps integral

Ambdós són paràmetres ajustables en el sistema.

# 1. INTRODUCCIÓ

---

## 1.4.1. NIVELLS DE CONTROL A LES EDAR

L'estructura de control *feedback* és la més utilitzada en el control de processos. S'anomena control en llaç tancat, control *feedback* o simplement control. I generalment és el que s'utilitza per al control local de nivells, pressions, temperatures i cabals. El funcionament d'aquesta estructura de control i els tipus de controladors es troben descrits en el apartat 1.3. En la posada en marxa del controlador i la seva posterior avaluació, el sistema de control és ajustat i els rendiments avaluats a partir de la modelització de la planta i posterior simulació. Segons els tipus de control aplicats (Olsson, 2005), apareixen quatre nivells d'automatització en les plantes depuradores d'aigües residuals:

- Nivell I

Consistent en ajustaments manuals basats en resultats analítics de laboratori, essent aquest primer nivell la forma més comuna de realitzar el control/operació de la planta.

- Nivell II

Ajustament manual del control basat en la mesura *on-line* dels nutrients. Aquest nivell de control es caracteritza per utilitzar mesures *on-line* dels nutrients com a mesura d'informació i com a base per realitzar els ajustaments manuals en el sistema de control SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Les mesures *on-line* poden provenir de sensors permanents instal·lats a la planta o d'estacions de monitoratge mòbils utilitzades en períodes de temps més curts. Amb aquestes mesures, l'operador de planta és capaç d'observar la dinàmica del procés, incloent les variacions diàries/setmanals en el rendiment del procés. A partir d'aquestes variacions conegudes, el control pot ser ajustat manualment, podent així avaluar l'efecte de les diferents accions de control.

- Nivell III

Control *closed-loop* implementat en un sistema SCADA i relacionat amb mesures *on-line*. Aquest nivell està format per simples llaços de control en línia, que han estat implementats dins del sistema SCADA. El càlcul del sistema SCADA només és compatible amb l'aplicació d'algoritmes de control senzills i basats en mesures sobre temps real. No hi ha dades històriques disponibles en l'avaluació de control, però poden ser extretes per tal de determinar les diferents accions de control. Es pot utilitzar com a exemple una planta de nitrificació/desnitrificació on es vol implementar un sistema SCADA a les regles de control simples, basades en una sola mesura efectuada en un moment determinat. Per exemple, el punt de consigna de l'oxigen en una fase de nitrificació es determinaria a l'inici de la fase de mesura de l'amoni d'entrada.

# 1. INTRODUCCIÓ

---

- Nivell IV

Control avançat de supervisió a partir de la millora de les regles del sistema de control utilitzant un ajustament en línia i els informes d'acompliment. Aquest tipus de control és el més avançat i complex, i inclou el model basat en el control predictiu a partir de mesures *on-line*, combinades amb analítiques a curt i llarg termini. D'aquesta manera els retards de temps en el sistema de mesura poden ser compensats.

## 1.5. EVOLUCIÓ DEL CONTROL A LES EDAR

L'evolució del control aplicat a les EDAR (Olsson, 2012) es va desenvolupar de manera gradual en funció de la disponibilitat dels diferents tipus de sensors, de la instrumentació necessària i dels models que aconseguirien avaluar les diferents estratègies de control aplicades. El repte de controlar les plantes depuradores es va iniciar a principis dels anys 70. En aquell moment, ja s'havia detectat que el control de l'oxigen dissolt (OD) en els reactors biològics tenia importància des del punt de vista econòmic i, per tant, era un factor a considerar. També es va detectar la necessitat d'instrumentació *on-line* que donés la informació necessària, però no es trobava encara prou desenvolupada com tampoc ho estaven els models dinàmics representatius del comportament de la planta, que permetessin avaluar els beneficis del control. L'evolució, a grans trets, del control de les EDAR es veuria reflectida segons la següent cronologia:

1970: Van sorgir els termes d'adquisició i verificació de dades, formant part del monitoratge de la planta.

1977: Aplicació del control d'OD en una planta real utilitzant un PI, com a conseqüència de que les primeres experiències sobre el seguiment de la dinàmica de l'OD i el seu control, basades en sistemes ON/OFF aplicats als compressors, van resultar difícils de manipular i força imprecisos.

1978: Presentació del model ASM1 (*Activated Sludge Model 1*) capaç de representar el comportament "real" d'una EDAR amb eliminació de carboni i nitrogen.

1980: S'inicien els primers controls per a l'eliminació de nitrogen.

1984: El control d'OD ja es podia efectuar utilitzant un controlador sintonitzat.

1992-94: Es treballa sobre la possibilitat d'utilitzar el flux de recirculació interna com a variable manipulada, per tal d'assegurar la presència de nitrats en les zones anòxiques de les plantes amb desnitrificació.

# 1. INTRODUCCIÓ

---

1996: La lògica difosa va ser aplicada als sistemes de control tot i que ja havia estat desenvolupada per Zadeh als voltants de 1960. També va sorgir l'adaptació d'un control adaptatiu derivatiu per l'aportació de carboni extern sobre una planta pilot de pre-desnitrificació, assolint un bon ajustament del *set point* aplicat a la concentració de nitrats.

2002: Instal·lació d'un controlador robust en una planta real. Disseny d'un controlador de nivell de fangs per al control de la recirculació externa. Estudis de control *feedback* sobre la dosificació de productes químics per a l'eliminació del fòsfor, donant uns bons resultats sobre l'estalvi del producte utilitzat.

Presentació del programa COST 624/682 que conjuntament amb els models ASM permetien avaluar diferents estratègies operacionals i diferents tipus de control.

Com a conseqüència d'aquesta evolució, els termes: sensors, instrumentació i modelatge deixaven de ser factors limitants per al desenvolupament dels tipus de controls més sofisticats.

2006: Amb el protocol de referència presentat per Coop(2002) i la possibilitat d'utilitzar diverses plataformes de simulació, es varen realitzar avaluacions comparatives entre diferents estructures de control del tipus P, PI, PID i control *fuzzy*.

2007: Desenvolupament de les estructures de control *Feedback/Feedforward*.

2004-2008: Van sorgir els controladors predictius.

Contribuint a l'evolució del control de les EDAR, han estat molts els investigadors que han treballat al llarg de les darreres dècades per tal de donar aplicacions òptimes al control d'aquest tipus de plantes. De la revisió efectuada en el marc d'aquest treball, a partir de l'any 1995, s'han detectat bàsicament 4 nivells d'actuació:

- (1)** Un primer nivell, on es pot comprovar l'aplicació majoritària dels models biològics ASM1, ASM2 i la influència que el model de planta *Benckmark*, així com la possibilitat d'avaluació de costos (Copp, 2002) ha tingut sobre el desenvolupament del control de les EDAR. En aquest primer nivell s'hi troben els estudis següents:

# 1. INTRODUCCIÓ

---

Rauch i Harremoës (1999) van utilitzar un control predictiu a temps real basat en algoritmes genètics sobre un sistema de sanejament teòric basat en el model de Shilling et al. (1989) i planta virtual segons directrius ATV-1991. L'estratègia de control aplicada es basava en algoritmes genètics sobre les càrregues dinàmiques pluviomètriques. Com a conclusions del treball se'n va extreure que els sistemes de control predictiu no lineal conjuntament amb els algoritmes genètics es presentaven com una nova metodologia per minimitzar els efectes de les contaminacions transitòries en els sistemes de sanejament.

Alex et al. (1999) van aplicar controladors PI per tal d'avaluar diferents estratègies de control sobre una planta *Benchmark* teòrica sotmesa a diferents escenaris de pluja i tempesta. Les plataformes de simulació utilitzades eren FORTRAN i Matlab-Simulink i les estratègies de control avaluades van ser: el control d'OD en el darrer reactor aerobi de la planta *Benchmark* utilitzant un controlador PI (zero soroll, zero retard), amb la  $K_L a$  com a variable manipulada i la concentració d'OD com a variable controlada, i una segona estratègia amb controlador PI establint com a variable controlada els nitrats (amb una freqüència de detecció de cada 10 minuts i la recirculació interna com a variable manipulada). Sobre aquest treball es va arribar a la conclusió que, mitjançant la definició d'un entorn de simulació que inclogués un model de planta, les característiques de l'influent i els criteris de valoració, era possible establir una metodologia coherent i imparcial per avaluar diferents estratègies de control.

Flores-Alsina et al. (2010a) van proposar una anàlisi multi criteri per tal de seleccionar les estratègies de control més adequades per a l'eliminació de matèria orgànica i nutrients. L'anàlisi va ser aplicada a 17 estratègies de control utilitzant controladors PI i PI en cascada. L'estudi es va realitzar sobre un model de planta teòric *Neptune Simulation Benchmark* (NSP), destinada a l'eliminació de matèria orgànica, nitrogen i fòsfor, i constituïda per dos reactors anaerobis, dos d'anòxics i tres d'aerobis. El programa WEST va ser la plataforma de simulació utilitzada i el model biològic, l'ASM3. Les estratègies consistien en 17 combinacions de les diferents variables controlades (OD, amoni, nitrats i fòsfor) i les manipulades ( $K_L a$ , recirculació interna, flux d'addició de carboni, cabal de sortida de fangs i aportació de metalls) per als diferents reactors. L'anàlisi multicriteri va generar les conclusions següents: l'anàlisi clúster va determinar (i) que era una eina fiable per a la classificació de grups d'estratègies de control de la planta estudiada, mostrant les principals correlacions entre els criteris d'avaluació i les estratègies de control a partir de l'anàlisi dels principals components; A (ii) que aquesta anàlisi mostrava les principals correlacions entre els criteris d'avaluació i les diferents estratègies de control que tenien influència sobre aquests criteris i (iii) que

# 1. INTRODUCCIÓ

---

l'anàlisi de discriminació i les seves valoracions permetien trobar un conjunt mínim de criteris que permetien diferenciar les diferents estratègies aplicades.

Butler i Schütze (2005) van realitzar un estudi sobre el control integral d'un sistema de sanejament en un model de planta teòric desenvolupat per *l'Imperial College* i calibrat i validat aplicant les dades de la WWTP de Norwich (UK), constituïda per tancs d'emmagatzematge de pluja, tanc biològic i sedimentadors primari i secundari. L'eina de simulació utilitzada va ser el programa SYNOPSIS integrat per el *software* KOSIM (per al disseny del sistema de sanejament) i el *software* DUFLOW per a la simulació del comportament de la conca receptora. L'estudi va concloure que el programa SYNOPSIS demostrava la seva viabilitat com a eina de control integral.

Seggelke et al. (2005) van treballar en un control predictiu per a la regulació de l'influent en una EDAR segons descàrregues pluviomètriques, aplicat al sistema integral de sanejament de la ciutat de Hildesheim. A partir del model hidrològic KOSIM i la plataforma de simulació SIMBA, es varen efectuar prediccions dels cabals d'entrada a la planta durant les 24 hores posteriors a una descàrrega pluviomètrica, així com el pronòstic de concentracions d'amoni tant a l'entrada de l'EDAR com a la conca receptora de l'efluent al llarg d'aquest mateix període, comprovant que l'aplicació d'un control predictiu integral era capaç de millorar el rendiment del sistema de clavegueram i de la pròpia EDAR en períodes de pluja.

Vanrolleghem et al. (2005) van desenvolupar un control a temps real per al sistema de sanejament de Tielt (Bèlgica) utilitzant controladors proporcionals (P). L'EDAR del sistema eliminava nitrogen i fòsfor de forma biològica. El model hidrològic era l'HYDROWORKS i el model de conca receptora el dissenyat a partir del *Poekebeck System*, aplicat al riu Speibeek. Com a plataforma de simulació, es va utilitzar el programa WEST. Les dues estratègies de control aplicades tenien com a finalitat l'eliminació de pics d'amoni a la conca receptora. Una de les estratègies es basava en el control de la concentració d'amoni a la conca del riu a partir de la variació del flux de sortida del tanc de recollida de pluvials així com l'aeració i la recirculació de fangs en el tanc biològic. La segona estratègia, basada en les mateixes variables, incorporava a més de la primera estratègia, l'addició d'una bomba per tal d'augmentar el cabal d'entrada a l'EDAR quan aquesta treballava per sota de la seva capacitat. L'aplicació d'aquests sistemes de control va permetre demostrar que els sistemes de control a temps real aplicats a un sistema integral de sanejament aconseguien que la planta treballés sense vessaments i aportés a la conca receptora un efluent amb la qualitat desitjada.

# 1. INTRODUCCIÓ

---

Egea et al. (2007) van proposar l'optimització de la configuració d'un sistema de control integrat (controladors PI) en una EDAR a partir de l'índex integral de l'error quadràtic (ISE). L'estudi es va aplicar en una planta teòrica *Benchmark* d'eliminació de carboni i nitrogen, amb el suport de la plataforma SIMULINK de Matlab. Les estratègies analitzades proposaven com a variable controlada l'OD en el darrer reactor aerobi a partir de la variació de la  $K_{La}$ , així com el control dels nitrats en el segon reactor anòxic, a partir de la manipulació de la recirculació interna. Els autors van concloure que els problemes d'optimització que es presenten durant el disseny d'un control d'aproximació integrat, sovint no són convexes i que els resultats obtinguts en el estudi indicaven que els mètodes basats en algorismes d'interpolacions de base radial (RBFs), poden reduir significativament el temps de càlcul alhora que garanteixen la convergència de l'òptim obtingut.

Stare et al. (2007) van proposar la comparació d'estructures de control, en què es comparaven 5 diferents estratègies: (1) en llaç obert (*OPEN-LOOP*) amb control de l'N total i amoni en el darrer reactor aerobi a partir de la manipulació de la  $K_{La}$  i aportació externa de carboni, (2) variable controlada OD (controlador PI) i variable manipulada  $K_{La}$ . (3) Aplicació de dos llaços de control, un primer llaç amb nitrat en el darrer reactor aerobi (controlador PI) i com a variable manipulada l'aportació externa de carboni. El segon llaç amb variable controlada l'amoni en el darrer reactor aerobi (controlador PI) i com a variable manipulada  $K_{La}$ . (4) la quarta estratègia controlava l'amoni en el efluent (PI), variant l'aportació externa de carboni, i finalment (5) un model predictiu de control on, en un primer llaç, es controlava l'amoni i en un segon llaç l'amoni i els nitrats, amb variables manipulades de *set point* d'OD per al primer i aportació externa de carboni per al segon. Com a entrada en el model predictiu s'hi van incorporar les pertorbacions de cabal i de concentració d'amoni en l'influent, demostrant així que les estratègies que utilitzaven un control *on-line* d'amoni i de nitrats obtenien millors rendiments i costos inferiors que el sistema *OPEN-LOOP*, que amb un simple controlador PI de nitrats i un PI *feed-forward* d'amoni s'obtenien molt bons resultats i que un sistema MPC (Model Predictiu de Control) només és aplicable quan es treballen amb grans càrregues i les probabilitats de penalització són molt elevades.

Holenda et al. (2008) van comparar models predictius de control avaluats a partir de dos diferents mètodes: el mètode integral de l'error absolut (IAE) i l'integral de l'error quadràtic (ISE), aplicats a dues estratègies: (1) control de l'OD en el darrer reactor aerobi, a partir de la manipulació de  $K_{La}$  i (2) control dels nitrats al darrer reactor anòxic, manipulant la recirculació interna. Els resultats obtinguts van demostrar que el control millorava significativament quan es disminuïa el temps de lectura del controlador (la integral de l'error absolut disminuïa en un 40% quan el temps de mostreig passava de 85 s a 20 s), però no millorava significativament ni la qualitat de l'efluent ni el consum energètic en l'aeració. Respecte al model predictiu de control es

# 1. INTRODUCCIÓ

---

va concloure que els límits de predicció baixos i mínimes càrregues en l'influent feien disminuir l'error entre el *set point* i la concentració real d'OD.

Shen et al. (2008) van efectuar estudis sobre models predictius de control, en aquest cas, la concentració d'amoni, els TSS, la DBO, DQO i l'N total en el efluent actuaven com a variables controlades, mentre que les recirculacions interna i externa, la purga de fangs i la  $K_La$  de les zones aeròbies, eren les variables manipulades. Les seves conclusions mostraven que el model predictiu de control pot ser utilitzat eficaçment obtenint-se un bon índex de qualitat en el efluent i baixos costos d'aeració.

Akyurek et al. (2009) van avaluar mitjançant els mateixos mètodes (IAE i ISE) diferents estratègies de control per a l'eliminació de matèria orgànica a partir de controladors PID, comparant models predictius de (1) control lineal, (2) no lineal, (3) mitjana mòbil autoregressiva no lineal, (4) control òptim amb programació seqüencial quadràtica (SPQ) i (5) model predictiu de xarxa neuronal, en què per a cada estratègia la variable controlada era la DBO en el efluent i la manipulada l'OD del reactor biològic. Els resultats van indicar que el controlador NARMA-L2 i el controlador SQO eren els sistemes que eliminaven la màxima quantitat de matèria orgànica amb mínims costos d'aeració.

Wahab et al. (2009) van comparar dues estructures de control basades en PID multivariables a partir de la simulació de dues estratègies de control de l'OD i recirculació interna mitjançant la manipulació de la  $K_La$ . En ambdós casos, van assolir un bon ajustament dels controladors M-PID alhora que van millorar l'eliminació de nitrogen i l'estalvi energètic.

Cunha Machado et al. (2009) van efectuar estudis de redisseny d'una planta real a partir de simulacions i van dissenyar el sistema de control més adequat per la nova estructura de planta, aconseguint una òptima reconversió de la planta i un control efectiu de la mateixa, a partir de les avaluacions de les diferents propostes de control consistents en les múltiples combinacions de posicionament de les variables controlades (amoni, nitrats i fosfats), aplicant per a totes les combinacions l'OD en el darrer reactor aerobi i les recirculacions interna i externa com a variables manipulades.

Flores-Alsina et al. (2010b) van dur a terme una avaluació multi objectiu sobre diferents alternatives de control en un model de planta *Lutzak-Ettinger* modificada, utilitzant diferents estratègies amb controladors PI, *ON/OFF*, PI en cascada, amb combinacions d'OD, amoni i nitrats, utilitzats com a variables controlades i  $K_La$ , *set point* d'OD, flux d'aportació externa de carboni i cabal de purga com a variables manipulades. Van concloure que els factors més importants, pel que fa al rendiment de la planta, eren la font externa de carboni, l'aeració i el controlador de TSS, mentre que la quantitat de carboni extern, l'energia d'escalfament, els problemes de sedimentació i els percentatges de violacions de la DBO van ser identificats com als



# 1. INTRODUCCIÓ

---

factors més diferenciats entre els termes mediambientals, econòmics i legals.

Zubowicz et al. (2010) van aconseguir un bon calibratge dels controladors PI a partir de la simulació d'un model de planta teòric UCT (*University of Cape Town*), constituïda per un reactor anaeròbic, un d'anòxic i tres d'aerobis, aplicant aquest tipus de controladors en tots cinc reactors, on es controlava la concentració d'OD a partir de la variable manipulada  $K_{La}$ .

Guerrero et al. (2011) van optimitzar els *set points* d'un sistema de control amb eliminació de C/N/P utilitzant controladors PI i PI en cascada, fent servir el model ASM2d mitjançant la simulació d'una planta pilot integrada per un reactor anaerobi, un d'anòxic i dos d'aerobis amb 146 L de capacitat total. Les diverses estratègies de control desenvolupades estaven basades en diferents combinacions del control d'OD, nitrats i TSS (en els diferents reactors) i d'amoni en l'influent amb variables manipulades:  $K_{La}$ , *set points* d'OD, recirculació interna i purga de fangs respectivament. Els *set points* de referència es podien ajustar per a diferents dies de la setmana i durant episodis de pluja i tempesta, aconseguint així baixes concentracions de contaminants en els efluent i amb mínims costos d'operació.

Vlad et al. (2011) van presentar un treball sobre control predictiu a temps real (*online*) per al control de la concentració de substrat en l'efluent d'una planta ASP (*Activated Sludge Process*), proposada per Nejari et al. (1999) d'eliminació de matèria orgànica i sotmesa a descàrregues pluviomètriques, utilitzant com a variable controlada la concentració de substrat en l'efluent (mesurat a partir de la concentració d'OD) i com a variable manipulada, el temps de retenció hidràulic. Els resultats de les simulacions van demostrar un bon comportament del sistema de control respecte del tractament amb cabals i qualitats d'efluent quasi constants.

De Araújo et al. (2011) van dissenyar una estructura de control descentralitzat per a una planta *Benchmark* amb variables controlades d'OD en els reactors aerobis, nitrats en el segon tanc anòxic i amoni en el efluent, essent les variables manipulades,  $K_{La}$ , recirculació interna i externa i purga de fangs, respectivament. Malgrat la simplicitat del sistema de control (*feed-forward*), els paràmetres controlats es van mantenir dins dels límits legislatius.

Hernández-del-Olmo et al. (2012) van desenvolupar un control basat en algorismes de reforç d'aprenentatge constituït per la interacció d'un agent amb el seu entorn. El medi ambient (entorn) va ser modelat per processos de decisió de Markov (MDP) i l'agent com a element controlador del *set point* d'OD en el procés d'eliminació de nitrogen. Tot i que les tècniques d'intel·ligència artificial utilitzades en les EDAR segueixen generalment enfoc cognitiu, en aquest cas es mostrava un experiment amb un agent seguit d'un enfoc emergent mitjançant un model lliure de tècniques de reforç.

# 1. INTRODUCCIÓ

---

Pires et al. (2005) van treballar amb un sistema *fuzzy* per al control integrat d'una planta pilot formada per un reactor anaerobi (8 L), un d'anòxic (8,5 L) i un sedimentador (2,5 L), comprovant l'eficiència del sistema de control quan la planta presentava xocs de nitrogen a partir del control de DQO/N i manipulació de la recirculació interna, així com xocs hidràulics amb control de la relació DQO/N i manipulació de l'influent d'entrada mitjançant l'accionament d'un *bypass*. El sistema de control va assolir un augment molt significatiu de la taxa de desnitrificació.

- (2) Un segon nivell d'actuació detectat entre els autors revisats és el que correspon a aquells que han centrat els seus estudis de control en plantes pilot. Aquest és el cas dels investigadors següents

Zhao et al. (1995) van avaluar diferents estratègies basades en controls *ON/OFF* sobre una planta pilot *BIODENIPHO*, integrada per un tanc anòxic (200 L), dos tancs aerobis (800 L cada un) i un sedimentador (1000 L), els reactors interconnectats operant de forma seqüencial mitjançant l'alternança dels fluxos i condicions d'operació. Els resultats obtinguts van ser comparats amb les simulacions obtingudes utilitzant el model ASM1 i les estratègies avaluades estaven dirigides a l'eliminació de nitrogen i a l'estalvi energètic. Per al primer objectiu, es varen comprovar dues estratègies: una en què la variable manipulada era el temps d'operació de les diferents combinacions de les zones anòxiques i aeròbies i la variable controlada, l'eliminació o reducció de nitrats, i una segona estratègia basada en les diferents combinacions de les zones anòxiques i aeròbies prenent l'N total com a variable controlada. Per a l'estalvi energètic, el *set point* d'OD era la variable manipulada i l'eficiència sobre la nitrificació la variable controlada. D'aquest estudi es va concloure que el model ASM1 es presentava com a una bona eina per descriure la dinàmica del nitrogen permetent l'avaluació de conceptes com la nitrificació/desnitrificació i que les estratègies de control proposades compensaven, de manera efectiva, els problemes operacionals de la planta, com ara la disminució de l'eficiència d'eliminació de nitrogen, assolint amb aquestes estratègies uns bons rendiments de desnitrificació.

Carrasco et al. (2003) van desenvolupar una diagnosi dels estats d'acidificació en una planta pilot de tractament anaerobi (1,1 m<sup>3</sup>) aplicant un sistema de control *fuzzy* i demostrant que aquest tipus de control era capaç d'informar a l'operador sobre l'estat d'acidificació del procés. Els resultats del diagnòstic permetrien determinar les millors actuacions en funció de l'estat detectat si aquests resultats fossin introduïts a l'entrada d'un altre control de supervisió difosa.

# 1. INTRODUCCIÓ

---

Wang et al. (2007) van comprovar l'efecte de les variables operacionals (OD, recirculacions interna i externa, purga de fangs, addició externa de carboni i volum de la zona anòxica) en una planta pilot amb pre-desnitrificació. La planta constava d'un tanc pulmó que alimentava al tractament biològic integrat per dos reactors anòxics, tres d'aerobis (8 L cada un) i un sedimentador (20 L). La recirculació interna era conduïda des del darrer tanc biològic a l'entrada de l'influent al igual que la recirculació externa que incorporava el licor de mescla des del sedimentador. Les estratègies de control comprovades, utilitzant controladors PID aplicaven com a variable manipulada l'OD per al control de l'amoni, els nitrats i l'N total en l'efluent, així com la manipulació de la recirculació externa per al control de les mateixes variables anteriors. L'aportació externa de carboni va ser utilitzada com a variable manipulada per al control de nitrats de les zones anòxiques i aeròbies, així com nitrats, amoni i N total en l'efluent. Finalment la variació del volum de la zona anòxica va ser utilitzada per al control de les concentracions d'amoni, nitrats i N total en l'efluent. Els autors van assolir per a cada variable operacional (manipulada) un punt òptim que aconseguia un màxim rendiment de desnitrificació per a l'influent tractat (influent sintètic amb composició semblant a una aigua residual urbana).

Gao et al. (2009) van efectuar un control analític de la nitrificació, pH i ORP a temps real a partir de la manipulació de l'aeració en un reactor pilot seqüencial SBR (reactor que pot actuar com a tanc aerobi, anaerobi i sedimentador i de 38 L de capacitat), i van comprovar que el control a temps real no comportava un impacte negatiu sobre un excés d'aeració, sinó que era capaç de mantenir estable la taxa de desnitrificació.

Muñoz et al. (2009) van desenvolupar un sistema de control supervisor/predictiu basat en lògica *fuzzy* utilitzant controladors PI i PID, en una planta pilot constituïda per un sol reactor biològic actuant com a anòxic/aerobi, i un sedimentador secundari. Es varen aplicar sistemes de control proporcional integratiu modificant els valors de les constants  $K_p$  i  $T_i$  del controlador per tal d'aconseguir que s'apropessin als del model predictiu de control. En aquest cas, els autors van desenvolupar un sistema de control supervisor utilitzant models *fuzzy Takagi-Sugeno* capaços de generar *set points* òptims de pH i d'OD per tal d'estabilitzar la nitrificació parcial de l'amoni en el reactor biològic fins a valors del 95%.

Ferrero et al. (2010) van construir un model de control supervisor a tres nivells (adquisició de dades mitjançant sistema SCADA, mòdul de control supervisor basat en el coneixement i informació a temps real), sobre una planta pilot amb configuració UCT (anaerobi (17 L) /anòxic (17 L) / aerobi (42 L)) i separació posterior dels fangs per membrana (capacitat de 24 L i superfície filtrant de 40 m<sup>2</sup>), aconseguint que el sistema de control proposat aportés una major fiabilitat en el procés de filtració amb MBR i un estalvi energètic sense modificar el seu bon funcionament.

# 1. INTRODUCCIÓ

---

- (3) Altres autors han estudiat l'aplicació dels sistemes de control en plantes reals, tot i que el nombre és més reduït degut a la seva complexitat. Posteriorment, amb el nou mil·lenni, es detecta un canvi derivat de la voluntat d'aplicar noves estratègies de control sotmeses prèviament a validació mitjançant els models matemàtics desenvolupats anteriorment o bé amb noves metodologies de control que incorporen el coneixement expert. Un bon exemple del primer cas ens l'ofereixen els estudis següents

Rodríguez-Roda et al. (2002) que van implementar un sistema híbrid de control a la planta de Granollers (Barcelona), que combinava un algoritme de control avançat amb tècniques basades en el coneixement a partir d'un sistema integrat a tres nivells: (1) adquisició de dades per sistema SCADA, de diagnosi integrat per un sistema expert, (2) un sistema basat en casos i (3) un sistema de suport a la decisió mitjançant model matemàtic, aconseguint que, una vegada validat el sistema de control implementat a l'EDAR, fos capaç de controlar de forma efectiva el funcionament de la planta.

Ayesa et al. (2006) van desenvolupar un sistema aplicat a l'EDAR de Galindo (Bilbao) d'eliminació biològica de nitrogen i van avaluar les possibilitats d'un sistema de control independent, utilitzant controladors PID. El *software* de simulació va ser la plataforma WEST. Sobre la planta modelitzada es van comprovar tres estratègies diferents de control: (1) la concentració d'amoni en l'efluent actuava com a variable controlada i els *set points* d'OD dels reactors aerobis com a variable manipulada, (2) la variable controlada era el potencial de desnitrificació i la manipulada el flux de recirculació externa i (3) control de la concentració de la biomassa en els tancs biològics a partir de la manipulació de la taxa de recirculació externa. De l'estudi es va concloure que el primer llaç de control aconseguia mantenir la concentració d'amoni prop del punt de consigna a excepció d'algunes oscil·lacions, que els autors van indicar que podrien ser compensades mitjançant una acció *feed-forward* del controlador. També es va proposar una millora de la sensibilitat del controlador i que el bucle de control de la tercera estratègia permetia mantenir un valor estable per a la biomassa, tot i les pertorbacions que presentava la càrrega de l'influent. Una vegada estudiat aquest sistema de control va ésser aplicat amb èxit a l'EDAR.

Fiter et al. (2005) van aplicar un control basat en lògica *fuzzy* en l'EDAR de Taradell i de Granollers (Barcelona). En el primer cas (EDAR Taradell), el sistema de control *fuzzy* aplicat anava destinat a la millora del consum energètic a l'aeració i com a conclusió del treball se'n va extreure que aquest tipus de control es presentava com una bona eina per al control de l'OD a la planta en què, mitjançant les variables mesurades (OD i ORP), es millorava l'aeració amb un estalvi econòmic d'un 10%. En el segon cas (EDAR de Granollers), el control *fuzzy* es va utilitzar per millorar les concentracions de TSS en l'efluent, objectiu que es va assolir de forma efectiva.

# 1. INTRODUCCIÓ

---

Cunha Machado et al. (2009) van proposar el redisseny de la planta de Manresa (Barcelona) i establir el control més adequat al nou disseny proposat, a partir de controladors PI. En aquest treball es va concloure que la millor estructura de control era la descentralitzada, aconseguint així una minimització de les pertorbacions alhora que assolia un estalvi energètic mantenint la qualitat de l'efluent.

Kandare et al. (2012), van aplicar un control expert adaptatiu/predictiu (ADEX) com a complement dels controladors PI i PID aplicats a la nitrificació/desnitrificació de l'EDAR de Ceutí (Murcia), on a partir de l'OD com a variable controlada i l'aportació del cabal d'aire com a variable manipulada, es va constatar que el controlador ADEX mantenia uns nivells d'OD i ORP en els reactors que repercutien en un funcionament global satisfactori i un estalvi energètic de l'aeració proper a un 29%.

- (4)** A partir del 2000 i amb la confiança de disposar de models més eficients i algorismes de control més potents, s'inicia l'estudi del control integrat de sanejament (clavegueram i EDAR). Unes bones referències d'aquests casos són:

Pleau et al. (2005) van utilitzar el model hidràulic ARMA, aplicat al sistema integral de sanejament de la comunitat urbana del Quèbec (EDAR de Westerly). El control a temps real del sistema de sanejament sobre la regulació del flux d'entrada a l'EDAR va permetre una reducció d'un 70% del volum de vessaments durant l'any 2000.

Seggelke et al. (2005) van aplicar el model hidràulic KOSIM, al sistema integral de sanejament de Hildesheim (Alemanya). Es van realitzar prediccions dels cabals d'entrada a la planta durant les 24 hores posteriors a una descàrrega pluviomètrica així com pronòstics sobre les concentracions d'amoni en l'efluent durant el mateix període, comprovant que l'aplicació integrada assolia millores en el rendiment del sistema de clavegueram i en l'EDAR durant períodes pluviomètrics.

Devesa et al. (2012) van fer servir un model integrat com a eina de suport en el sistema de sanejament de la conca del riu Besós (Barcelona). Es va desenvolupar un model integrat com a suport a la presa de decisions per a la gestió de la conca del riu Besós (EDAR de La Garriga, Barcelona) que va resultar molt positiu per a la gestió de la xarxa de sanejament quan aquesta presentava possibles pertorbacions com ara vessaments industrials, índexs pluviomètrics elevats o bé obstruccions en les canonades. L'estudi es va basar en la utilització de tancs d'emmagatzematge i derivacions entre els sistemes de clavegueram.

Respecte a les metodologies emprades, en aquesta revisió s'observa que en la majoria dels casos s'utilitza, com a element base del control, els controladors P, PI, PI en cascada i PID sobre els que hi apliquen modificacions, per tal d'afrontar la complexitat

# 1. INTRODUCCIÓ

---

del procés estudiat. Són els casos de: (1) Flores-Alsina et al. (2010b) que compara l'acció dels controladors PI i PI en cascada per a mateixes variables controlades i manipulades, (2) Egea et al. (2007) que avalua l'acció integrada d'un controlador PI per dos sistemes, el de l'integral de l'error absolut (IAE) i la integral de l'error quadràtic (ISE), (3) Muñoz et al. (2009) que complementa els controladors PI o PID amb un model predictiu basat en lògica *fuzzy*. Una excel·lent revisió fins al moment de la seva publicació l'ofereix Flores-Alsina et al. (2010b). Una altra estratègia que s'ha avaluat especialment en simulació és la aplicació de sistemes predictius i/o adaptatius com són els casos de Holanda et al. (2008), Shen et al. (2008), Vlad et al. (2011), Kandare et al. (2012) i Cristea et al. (2011). Aquest últim va enfocar l'estudi en la composició d'un algoritme de control predictiu no lineal híbrid (HMPC) i un controlador, aplicat a una EDAR d'eliminació de matèria orgànica. De l'estudi se'n va derivar que l'HMPC es presentava com una eina molt eficient per al control dels nivells d'OD en processos de fangs activats, reduint així l'energia d'aeració sense necessitat d'utilitzar elevades freqüències de mostreig.

Cal destacar, també, els esforços que alguns autors han fet per integrar eines d'intel·ligència artificial que permetin incorporar el coneixement expert. Aquesta tendència que es va iniciar a finals del segle passat, es continua desenvolupant amb intensitat ja que aquesta integració permet incorporar l'expertesa com a complement dels algorismes de control automàtic. Per exemple, Rodríguez-Roda et al. (2002) proposen un sistema híbrid de control que combina algorismes de control avançat amb tècniques basades en el coneixement per tal d'optimitzar el funcionament d'una EDAR real. Pires et al. (2005), apliquen un control expert basat en lògica *fuzzy* per tal de minimitzar la influència dels xocs hidràulics i de nitrogen. Comas et al. (2009), apliquen un sistema de suport a la presa de decisions per tal d'optimitzar l'aeració en una planta pilot integrada per un reactor discontinu de membrana (MBR), aconseguint un sistema de control capaç d'optimitzar l'aportació d'aire, reduint així els costos energètics i la taxa d'embrutiment de la membrana. Ferrero et al. (2010), sobre una planta pilot UCT, proposen un sistema de control supervisor per optimitzar el seu funcionament. Kandare et al. (2012) apliquen un control expert adaptatiu/predictiu (ADEX) com a complement dels controladors PI i PID, aplicat sobre una planta real i van concloure que aquest sistema es presenta com una eina molt eficaç per al control de l'OD. Prat et al. (2012), presenta un model basat en el coneixement com a sistema suport a la presa de decisions, aplicat al sistema de sanejament del riu Congost (Catalunya) per tal d'optimitzar el seu rendiment en front de possibles pertorbacions a partir de l'aplicació del simulador Monte Carlo.

# 1. INTRODUCCIÓ

---

Finalment, i a partir de la present revisió, s'ha pogut observar que un 36% dels autors han aplicat la seva investigació en casos d'optimització i/o seguiment de la desnitrificació, obtenint considerables millores al respecte. El tipus de controladors més utilitzats en gran diferència, (62%), són els PI, seguits dels PID (19%), PI en cascada (10%) i P( 9%).

S'ha efectuat sobre la revisió bibliogràfica una anàlisi de quines han estat les variables manipulades i controlades més utilitzades. Els resultats obtinguts s'han resumit a la taula 1.2. Degut a la gran variabilitat d'estudis realitzats, algunes de les variables poden semblar poc útils dins d'un camp d'aplicació real, com ara podrien ser el TRH o bé volum del reactor, però per l'autor corresponent han estat aplicades per tal d'avaluar el comportament de la planta en casos de xoc hidràulic, en què s'ha variat el cabal d'entrada mitjançant by-pass o tancs de retenció (cas del TRH). També seria aplicable la variació del volum del reactor en el cas del redisseny d'una planta en la que es vol comprovar quins serien els resultats de depuració quan es varien els volums de les zones aeròbies o anòxiques.

# 1. INTRODUCCIÓ

Taula 1.2 : Relació de variables (manipulades i controlades) més utilitzades.

	VARIABLE	NIVELL D'APLICACIÓ (%)
MANIPULADES	Coefficient global de transferència d'oxigen $K_La$	24
	<i>Set-point</i> d'OD en cascada	20
	Recirculació interna	18
	Flux d'addició externa de C	12
	Recirculació externa	9
	Purga de fangs	7
	Temps de retenció hidràulic (TRH) (per modificació del cabal d'entrada, bypass o tancs de retenció).	5
	Temps d'operació de les combinacions anòxica/aeròbia en SBR	3
	Volum del reactor anòxic/aerobi (simulacions amb objectius de redisseny de plantes)	1
CONTROLADES	Amoni ( $NH_4^+$ ) en l'efluent	23
	OD en reactors aerobis	23
	$NO_x/N$ en l'efluent	22
	N total en l'efluent	12
	TSS efluent/reactors biològics	5
	$PO_4^{3-}$ en l'efluent	5
	DBO en l'efluent	2
	DQO en l'efluent	< 2%
	OD en l'efluent	< 2%
	Recirculació interna	< 2%
	Relació DQO/N	< 2%
	Potencial de desnitrificació	< 2%
	MVSS	< 2%
	Taxa de nitrificació	< 2%
	Coefficient global de transferència d'oxigen, $K_La$	< 2%



# 1. INTRODUCCIÓ

---

## 1.6. LES SIMULACIONS COM A EINA D'ANÀLISI I AVALUACIÓ.

Una vegada establerts els sistemes de control més adequats i per tal de comprovar la seva eficàcia es fa necessari la utilització d'un procediment estàndard capaç d'avaluar-les a partir de les simulacions dinàmiques per ordinador. Aquestes simulacions proporcionen una relació qualitat/costos, considerada efectiva per a la valuació de les estratègies sotmeses a estudi. La utilització d'un protocol estàndard és doncs necessària a l'hora de comparar-ne els resultats. Aquestes són les raons per les quals es va crear una simulació de referència, apta per a una gran diversitat de plataformes (Coop et al., 2002). Una de les condicions necessàries és que cada estratègia sigui simulada en les mateixes condicions que la resta per tal de garantir la imparcialitat en les comparacions. Aquest protocol (procediment de simulació i valuació estandarditzat) proporciona:

- Una configuració tipus d'EDAR.
- Models de simulació (biològic i de sedimentació).
- Criteris de valuació que són utilitzats per tal de comparar les estratègies simulades.

OBJECTIUS

---



## 2. OBJECTIUS

---

### 2. OBJECTIUS

L'objectiu principal d'aquest treball és l'optimització dels costos energètics a la EDAR de la Vall del Ges (Barcelona), mantenint la qualitat de l'efluent segons els límits legals. Els objectius són tractats de forma integrada, a partir de la modelització de la planta i simulació de les diferents estratègies de control.

El fet d'optimitzar els costos energètics podria repercutir en una disminució del rendiment en l'eliminació de nutrients, en aquest cas del nitrogen, doncs en aquesta EDAR, el fòsfor és eliminat satisfactòriament per precipitació química.

La consecució d'aquests objectius comporten l'assoliment dels objectius específics següents:

- Primerament, el calibratge d'un model de referència, a partir de les dades disponibles de la planta, per tal de treballar amb les característiques dinàmiques del sistema. Això prèviament ha comportat la realització d'una anàlisi de sensibilitat local, per tal d'establir els paràmetres més sensibles en el calibratge del model biològic.
- Sobre el model de planta calibrat, la selecció de l'estructura de control més convenient, a partir dels resultats de simulació de les diferents estratègies. Les alternatives de control proposades seran avaluades sobre el model de referència, per tal de ponderar l'estratègia capaç d'assolir l'objectiu d'acompliment legislatiu en matèria de nitrogen.
- Posteriorment a l'anàlisi de la capacitat d'eliminació del contaminant, totes les alternatives de control proposades seran comparades sota criteris econòmics i d'estabilitat del procés, per tal d'obtenir un estalvi energètic que repercuteixi favorablement en els costos d'operació de la planta.



## MATERIALS I MÈTODES

---



## 3. MATERIALS I MÈTODES

---

### 3.1. EDAR DE LA VALL DEL GES

L'EDAR de la Vall del Ges tracta les aigües residuals de tres poblacions ubicades en la conca del riu Ges (Torelló, Sant Pere de Torelló, Sant Vicenç de Torelló i part de les Masies de Voltregà). El cabal d'entrada presenta un valor mitjà d'aproximadament  $4.600 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , amb una aportació industrial d'un 25 -35% del total.

La planta de tractament segueix una configuració Orbal™ està dissenyada (veure taula 3.1), per eliminar matèria orgànica i nitrogen de forma biològica i l'eliminació química de fòsfor que té lloc mitjançant l'addició de clorur de ferro (III) i la posterior precipitació en forma de fosfat de ferro (III). La línia d'aigua s'inicia en el pretractament, amb dos canals paral·lels d'eliminació de sorres i greixos, seguit d'un sistema de fangs activats, sense necessitat de sedimentació primària, característica d'aquest tipus d'estació depuradora. El reactor biològic, amb un volum de  $8000 \text{ m}^3$ , es troba dividit en tres canals. El canal extern, amb un volum de  $3430 \text{ m}^3$ , correspon a la zona anòxica, on té lloc la desnitrificació i on la concentració d'OD es manté en valors inferiors a 0,3 ppm. La zona aeròbia està integrada pels canals intermedi ( $2667 \text{ m}^3$ ) i intern ( $1903 \text{ m}^3$ ), on l'acció del sistema d'aeració facilita les concentracions d'OD necessàries per a la nitrificació de l'amoni, mantenint concentracions d'OD de l'ordre d'1 ppm en el canal intermedi i al voltant de 2-3 ppm en el canal intern. La recirculació interna transporta el licor de mescla del canal intern a l'extern, a on s'elimina també una part de matèria orgànica. Els tres canals es comuniquen per orificis interns i l'influent entra en el procés de tractament pel canal extern, passant a l'intermedi i finalment a l'intern. L'aportació d'oxigen es realitza mitjançant discos rotatoris o "rotors" ubicats sobre un eix horitzontal i governats per un motor que pot treballar a diferents velocitats (rpm). La configuració d'aquests rotors afavoreix la dispersió de l'aire en l'aigua. La regulació d'aquesta aportació s'efectua mitjançant la variació del nivell d'esfondrament del rotor, la variació del nombre de discos, la velocitat de treball del motor, o bé la variació del sentit de gir. La darrera etapa de la línia d'aigua és la sedimentació secundària, amb dos decantadors de  $1185 \text{ m}^3$  cada un. En aquest cas, abans d'entrar als decantadors, té lloc l'addició del clorur de ferro (III) en el licor de mescla per a l'eliminació química del fòsfor. Després de decantar, l'aigua tractada és abocada a la conca del riu Ges (influent del riu Ter). Dels fangs produïts en els decantadors, una gran part és recirculada cap al reactor biològic i l'excedent és conduït a la línia de fangs.

Aquesta línia està constituïda per un espessiment per gravetat i una deshidratació mecànica per filtres banda, prèvia addició de polielectròlit. La figura 3.1 representa un esquema de la planta de la Vall del Ges i la distribució del sistema Orbal™.



### 3. MATERIALS I MÈTODES

Taula 3.1: Característiques de disseny i condicions operacionals de l'EDAR de la Vall del Ges.

Cabal mitjà diari de l'influent	4584 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>
Cabal de disseny	6000 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>
Capacitat de tractament	42000 h-e*
Reactor biològic	8000 m <sup>3</sup> Canal extern ( 3370 m <sup>3</sup> ) Canal intermedi (2607 m <sup>3</sup> ) Canal intern (1843 m <sup>3</sup> )
Sedimentador	2370 m <sup>3</sup> (2 x 1185 m <sup>3</sup> )
Recirculació interna	23760 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>
Recirculació externa	4320 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>
Purga de fangs	230 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>

\* h-e. Definit per la Directiva 91/271/CE com a 60 g.de DBO/dia.

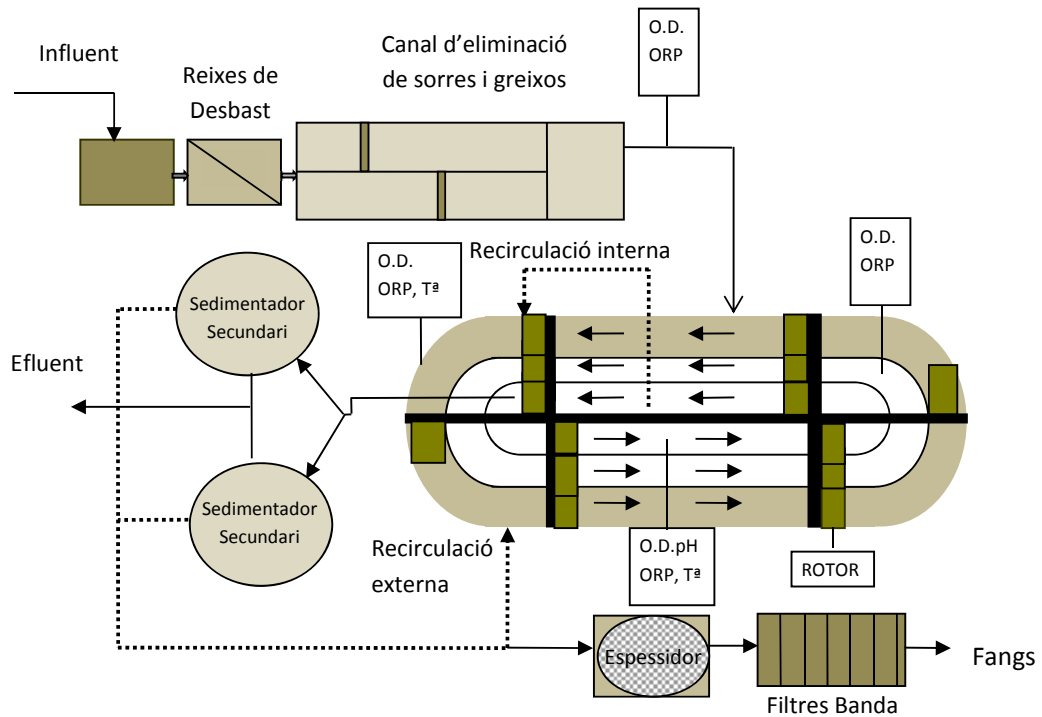


Figura 3.1: Esquema de l'EDAR de La Vall del Ges.

## 3. MATERIALS I MÈTODES

### 3.2. MODELS BIOLÒGICS

Segons Henze (2000), el més gran impacte dels models ASM està basat en tres fets: el primer és el llenguatge comú entre els modeladors, el segon els conceptes comuns de nomenclatura i el tercer les matrius ASM, fets que han permès desenvolupar un model consistent que no hauria existit si els usuaris haguessin utilitzat els seus propis conceptes sobre les notacions o bé diferents plataformes. El model ASM1, tot i presentar certes limitacions, és actualment un dels models biològics més utilitzats, tal com es pot comprovar a la revisió bibliogràfica del capítol I.

#### 3.2.1. MODEL BIOLÒGIC ASM1. PRINCIPALS PROCESSOS I COMPONENTS

Aquest model biològic considera quatre processos principals o models biocinètics. Com que les condicions poden ser aeròbies o anòxiques, s'arriba a un total de vuit models, segons esquema mostrat a la figura 3.2.

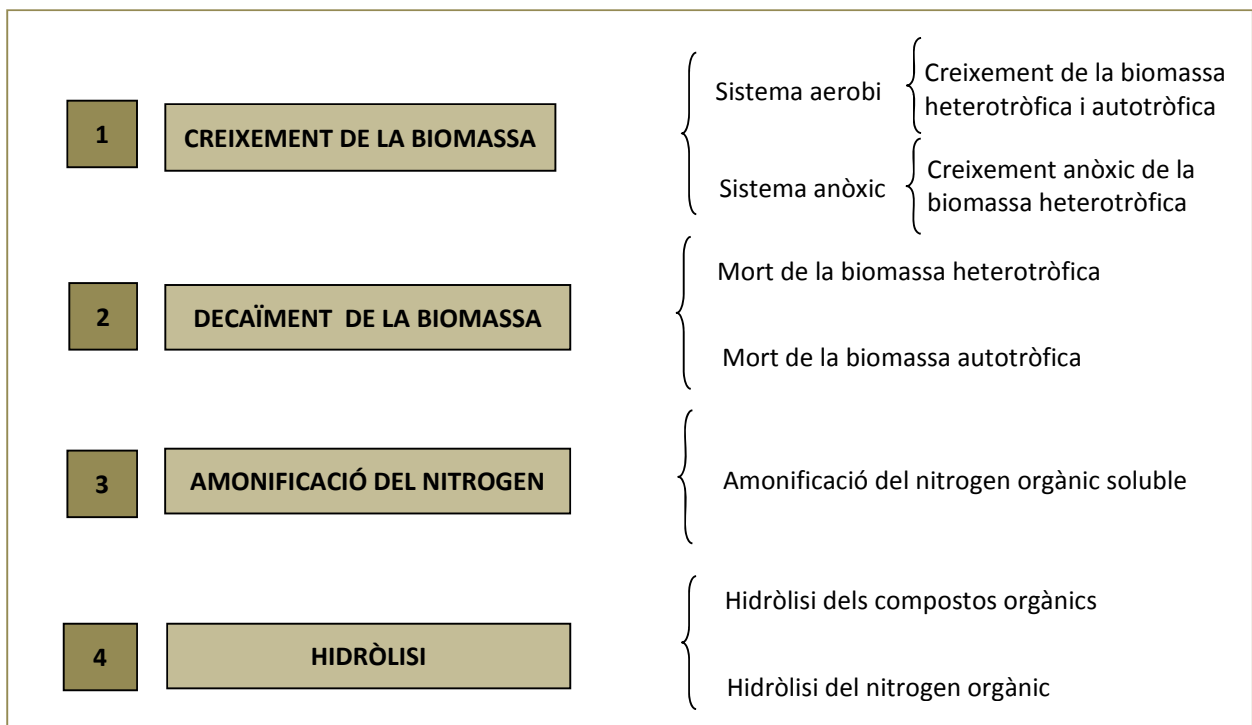


Figura 3.2: Principals processos del model ASM1.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

---

- Creixement aerobi dels heteròtrofs.

Es considera que només la fracció  $S_s$  participa en el creixement aerobi dels heteròtrofs, ja que la fracció  $X_s$  necessita ser prèviament hidrolitzada abans de ser transformada en  $S_s$  i utilitzada pels microorganismes. El creixement es modelitza utilitzant l'estructura de la cinètica de Monod, on la manca tant del substrat fàcilment biodegradable ( $S_s$ ) com l'oxigen dissolt ( $S_o$ ) poden actuar com a fraccions limitants. Aquest és el procés que més contribueix a la degradació de la DQO, al creixement de la biomassa i a l'increment de la demanda d'oxigen. L'amoni disminueix per part del creixement cel·lular alhora que té lloc una variació de l'alcalinitat.

- Creixement anòxic dels heteròtrofs.

En absència d'oxigen, els heteròtrofs facultatius són capaços, en presència de substrat ( $S_s$ ), d'utilitzar els nitrats com a acceptor final d'electrons. S'obtenen com a productes un increment de la biomassa i nitrogen gasós que és després de l'aigua (desnitrificació). Igual que en el creixement aerobi, s'utilitza la cinètica de Monod per al substrat associat a funcions d'activació/desactivació respecte als nitrats i a l'oxigen. S'aplica un factor de correcció  $\eta_g$  ( $< 1$ ) com a conseqüència de que la taxa de creixement dels heteròtrofs és inferior en medi anòxic que en medi aerobi. El canvi d'alcalinitat té lloc segons la reacció especificada a l'equació 1.8.

- Creixement aerobi dels autòtrofs.

En aquesta etapa, l'amoni és oxidat a nitrats i, com a resultat, té lloc un increment de la biomassa autòtrofa amb consum d'oxigen. L'amoni és també incorporat a les cèl·lules. El procés també presenta una variació de l'alcalinitat del medi i un consum d'oxigen. La formació de fangs és relativament baixa degut a que la taxa de creixement dels autòtrofs no és gaire significativa. El model cinètic és també del tipus Monod respecte de l'amoni i de l'oxigen.

- Decaïment dels heteròtrofs i dels autòtrofs.

Ambdós processos es modelitzen de la mateixa manera. El concepte de decaïment incorpora els fenòmens de lisi cel·lular, respiració endògena i mort o depredació. El tractament matemàtic del model ASM1 és diferent de l'enfoc tradicional que se li atribuïa abans, es a dir, un consum d'oxigen en la respiració endògena. En l'ASM1 s'utilitza el concepte de mort-regeneració, on la fracció de biomassa passa a descompondre's en MO lentament biodegradable més partícules no biodegradables ( $X_B \text{ -----} \rightarrow X_s + X_p$ ), sense consum directe d'oxigen.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

---

El consum d'oxigen es produeix posteriorment fins que ha tingut lloc la hidròlisi de  $X_S$  a  $S_S$  i aquesta fracció és consumida per la biomassa activa. Se suposa que el procés té lloc a la mateixa velocitat en condicions aeròbies i anòxiques, establint una cinètica de primer ordre respecte de la biomassa.

- Amonificació del nitrogen orgànic soluble.

Es modelitza amb una cinètica de primer ordre respecte de la fracció  $S_{ND}$  i respecte de la biomassa heteròtrofa.

- Hidròlisi de la matèria orgànica.

La matèria orgànica lentament biodegradable,  $X_S$ , és hidrolitzada per part dels enzims extracel·lulars, resultant una fracció de substrat ràpidament biodegradable que és utilitzat en els processos de creixement de la biomassa. La cinètica és considerada de primer ordre respecte de la biomassa, però té tendència a saturar-se quan la quantitat de la MO lentament biodegradable  $X_S$  és molt elevada respecte dels microorganismes heteròtrofs actius,  $X_{BH}$ . La hidròlisi és un procés que té lloc tant en condicions aeròbies com anòxiques, utilitzant un factor  $\eta_h$  ( $<1$ ) per significar el fet de que la hidròlisi en medi anòxic és inferior que en medi aerobi.

- Hidròlisi del nitrogen orgànic particulat.

El nitrogen orgànic particulat ( $X_{ND}$ ) forma part de la matèria orgànica particulada ( $X_S$ ). Per tant la taxa d'hidròlisi del primer es troba en funció de la taxa d'hidròlisi del segon. El model utilitzat mostra una relació de proporcionalitat entre les dues taxes.

- Procedència i modificacions a que estan sotmesos aquests components.

Les fraccions  $S_i$ ,  $S_s$ ,  $X_i$  i  $X_S$  procedeixen de l'aigua residual. D'aquestes quatre fraccions,  $X_i$  i  $S_i$  no estan sotmeses a cap conversió.  $S_i$  són els inerts solubles que es troben en el influent, per tant tenen una relació directa amb la seva qualitat i  $X_i$  passen a integrar-se en els sòlids volàtils del licor de mescla i a la purga de fangs. La fracció  $S_S$  s'utilitza en el creixement de la biomassa heteròtrofa en condicions aeròbies i anòxiques, mentre que  $X_S$  es va transformant en la fracció anterior per efecte de la hidròlisi, però cal considerar també que la lisi cel·lular de la biomassa autòtrofa i heterotròfica contínuament en va generant.

Les fraccions  $X_{BA}$  i  $X_{BH}$  són components de la biomassa activa. Generalment es considera negligible l'aportació d'aquests microorganismes per part de l'aigua residual.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

---

Per altra banda, la DQO total i els sòlids en suspensió volàtils (SSV) dels fangs de purga o del licor de mescla estan integrats per biomassa activa e inactiva :

$$X_{BH} + X_{BA} + X_P + X_I + X_S$$

La biomassa autòtrofa i heteròtrofa augmenta a partir del creixement aerobi i anòxic (només per la heteròtrofa), mentre que disminueixen en el procés de decaïment.

En decaure la biomassa  $X_{BA}$  i  $X_{BH}$  es forma un residu particulat inert ( $X_P$ ) que no participa en cap conversió. Només passa a integrar-se en la biomassa inactiva.

L'oxigen és consumit en el creixement dels autòtrofs i heteròtrof aerobis. El model no considera un consum directe en el decaïment (només indirectament a partir de la fracció  $S_S$  que prové de la lisi cel·lular).

Provinents de l'aigua les fraccions de nitrogen que el model considera són:  $X_{ND}$ ,  $S_{ND}$ ,  $S_{NH}$ ,  $S_{NO}$ . Apart d'aquestes fraccions n' existeixen d'altres que es troben incorporades a la biomassa, en els productes de lisi i en la fracció de matèria orgànica inert i que no són utilitzades en el model. Per això realitzar un balanç de nitrogen és impossible per la dificultat de quantificació del nitrogen gasós format en la desnitrificació.

L' $S_{NO}$  o fracció que inclou els nitrats i nitrits s'incrementa durant el creixement aerobi dels autòtrofs i és eliminada en el creixement anòxic dels heteròtrofs.

El nitrogen amoniacal  $S_{NH}$  que s'utilitza prové de l'amonificació del nitrogen orgànic soluble i és consumit principalment com a font d'energia en el creixement de la biomassa autòtrofa. Es considera que, a pH aproximadament igual a 7, aquesta fracció està integrada principalment pel catió amoni  $NH_4^+$ . En el model ASM1 es considera que l'oxidació a nitrats es fa de forma directa sense passar a nitrits.

El nitrogen orgànic soluble ( $S_{ND}$ ) és produït a partir de la hidròlisi de la seva forma particulada ( $X_{ND}$ ), mentre que durant l'amonificació decreix. La fracció  $X_{ND}$  disminueix degut a la seva hidròlisi, però apareix el seu equivalent quan té lloc el decaïment dels microorganismes autòtrofs i heteròtrofs ( $i_{XB} - f_P \cdot i_{XP}$ ). El producte  $f_P \cdot i_{XP}$  és la fracció no recuperable ja que es troba associada a la fracció inert dels productes de lisi.

El terme alcalinitat representa el balanç de l'alcalinitat ( $S_{ALK}$ ), i resulta molt complex introduir-lo en el model per preveure les variacions de pH. A la pràctica es considera que un descens de 50 ppm de  $CaCO_3$  en l'alcalinitat pot causar inestabilitat i baixades de pH a valors inferiors a 6, la qual cosa podria afectar significativament el procés de nitrificació.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

#### MODEL ASM1. PRINCIPALS COMPONENTS

Aquest model inclou un total de 13 components en els quals es fa distinció entre les fraccions solubles i insolubles de la matèria orgànica (mesurada en termes de DQO) i dels components nitrogenats (mesurats en termes d’N Kjeldhal total, nitrats i nitrats), tal com es pot observar a les figures 3.3 i 3.4 respectivament.

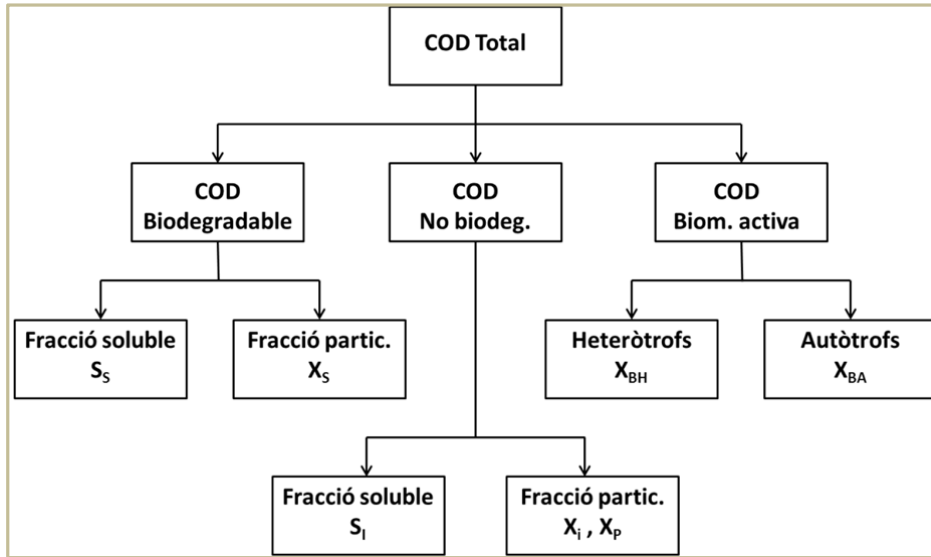


Figura 3.3: Components fraccionats de la DQO.

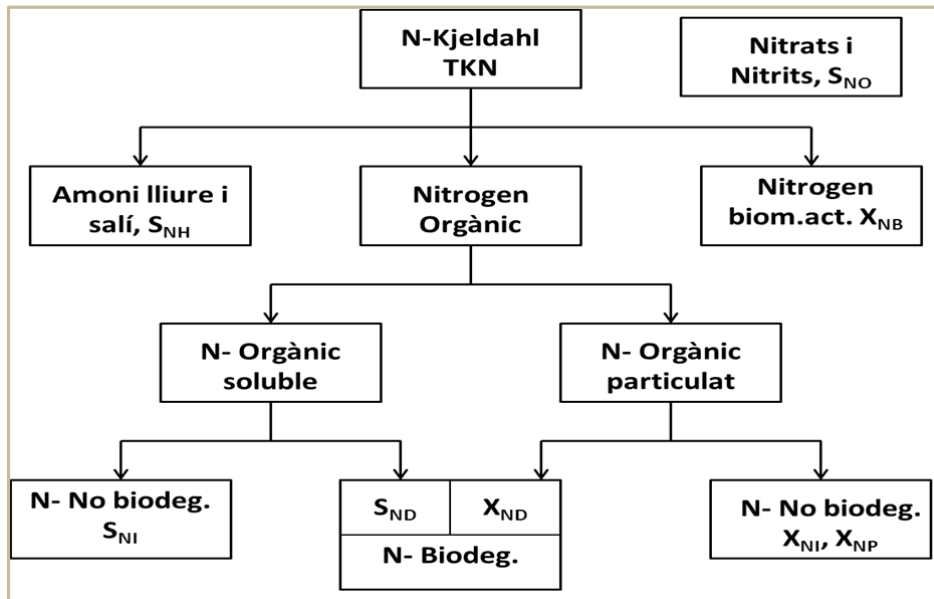


Figura 3.4: Components fraccionats del nitrogen total.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

Aquests components representats per variables d'estat o variables que descriuen l'estat d'un sistema dinàmic al llarg del temps, es troben definides a la taula 3.2.

Taula 3.2: Variables d'estat del model ASM1.

SÍMBOL	UNITATS	DESCRIPCIÓ DE LA VARIABLE D'ESTAT
$S_I$	$\text{g COD}\cdot\text{m}^{-3}$	Fracció no biodegradable i soluble que acompanya a l'efluent.
$S_S$	$\text{g COD}\cdot\text{m}^{-3}$	Fracció ràpidament biodegradable (en condicions anòxiques i aeròbies).
$X_I$	$\text{g COD}\cdot\text{m}^{-3}$	MO no biodegradable particulada.
$X_S$	$\text{g COD}\cdot\text{m}^{-3}$	MO lentament biodegradable (precisa d'una hidròlisi prèvia abans d'ésser degradada).
$X_{BH}$	$\text{g COD}\cdot\text{m}^{-3}$	Microorganismes heteròtrofs actius.
$X_{BA}$	$\text{g COD}\cdot\text{m}^{-3}$	Microorganismes autòtrofs actius.
$X_P$	$\text{g COD}\cdot\text{m}^{-3}$	Productes inerts procedents del decaïment de la biomassa.
$S_O$	$\text{g O}_2\cdot\text{m}^{-3}$	Oxigen molecular en forma dissolta present a l'aigua.
$S_{NO}$	$\text{g N}\cdot\text{m}^{-3}$	Formes oxidades del nitrogen (nitrits i nitrats).
$S_{NH}$	$\text{g N}\cdot\text{m}^{-3}$	Nitrogen en forma d'amoni.
$S_{ND}$	$\text{g N}\cdot\text{m}^{-3}$	Nitrogen orgànic soluble (transformat en amoni pel procés d'amonificació).
$X_{ND}$	$\text{g N}\cdot\text{m}^{-3}$	Nitrogen orgànic particulat (precisa d'un procés previ d'hidròlisi abans de la seva amonificació)
$S_{ALK}$	$\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	No és un paràmetre essencial pel model, però és indicatiu del canvis de pH que poden tenir lloc a l'aigua tractada.

La relació entre aquestes variables d'estat i les transformacions que tenen lloc en el model ASM1, descrites anteriorment, es troben resumides a la figura 3.5 (Grau, 2007).

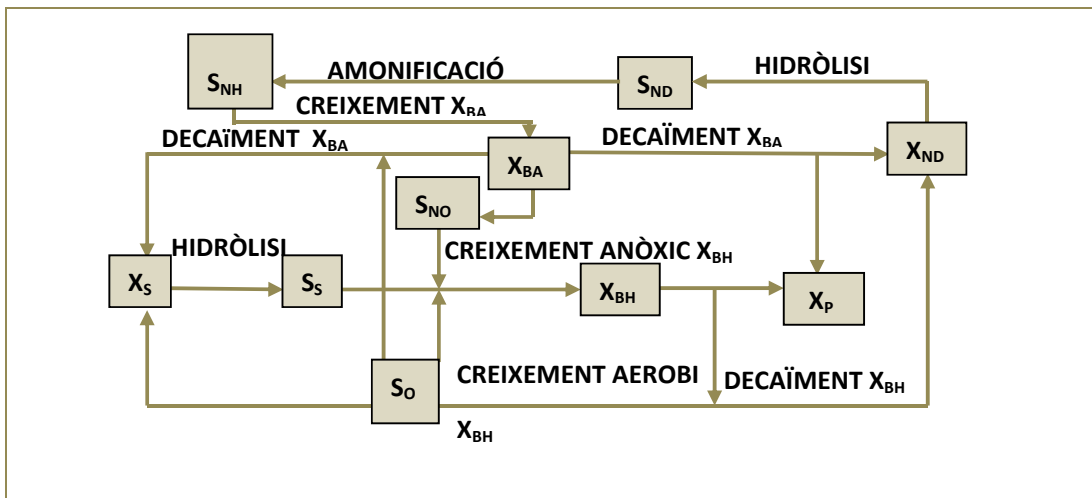


Figura 3.5: Relació entre les variables d'estat i les transformacions en el model ASM1.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

- FRACCIONAMENT DE L'INFLUENT

Les diferents fraccions anteriorment presentades s'obtenen a partir de paràmetres analítics de la planta, que es mostren a la taula 3.3 i que són calculades a partir de les corresponents equacions incorporades a la taula 3.4.

Taula 3.3: Paràmetres per a la caracterització de l'influent.

Paràmetre	Punt mostreig	Unitats
DQO soluble	efluent	$g \cdot m^{-3}$
DQO total	influent	$g \cdot m^{-3}$
DQO soluble	influent	$g \cdot m^{-3}$
DBO <sub>5</sub>	influent	$g \cdot m^{-3}$
NTK	influent	$g \cdot m^{-3}$
N-NH <sub>4</sub>	influent	$g \cdot m^{-3}$
N-NO <sub>3</sub>	influent	$g \cdot m^{-3}$
N-NO <sub>2</sub>	influent	$g \cdot m^{-3}$
TSS	influent	$g \cdot m^{-3}$
T <sup>a</sup>	influent	°C

Generalment la DQO soluble en l'efluent pren el valor de la DQO total, ja que una planta que obté bons rendiments de depuració i no presenta problemes de sedimentació té un efluent amb un baix contingut en TSS.

Taula 3.4: Equacions aplicables al càlcul de les variables d'estat.

Variable	Símbol	Unitats	Equació
Compostos solubles inerts	S <sub>I</sub>	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$	S <sub>I</sub> = DQOS efluent
Substrat fàcilment biodegradable	S <sub>S</sub>	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$	S <sub>S</sub> = DQOS influent-S <sub>I</sub>
Matèria particulada inert	X <sub>I</sub>	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$	X <sub>I</sub> = DQO <sub>T</sub> influent -(X <sub>S</sub> +S <sub>S</sub> +S <sub>I</sub> )
Substrat lentament biodegradable	X <sub>S</sub>	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$	X <sub>S</sub> =BDQO influent-S <sub>S</sub>
Nitrogen amoniacal	S <sub>NH</sub>	$g \text{ N} \cdot m^{-3}$	S <sub>NH</sub> =NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> influent
Nitrogen oxidat	S <sub>NO</sub>	$g \text{ N} \cdot m^{-3}$	S <sub>NO</sub> = NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub> influent
Nitrogen orgànic soluble	S <sub>ND</sub>	$g \text{ N} \cdot m^{-3}$	S <sub>ND</sub> =(DQO <sub>5</sub> influent/DQO <sub>T</sub> )*(NTKNH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )
Nitrogen orgànic particulat	X <sub>ND</sub>	$g \text{ N} \cdot m^{-3}$	X <sub>ND</sub> =(TKN <sub>T</sub> -NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )-S <sub>ND</sub>
Sòlids totals	TSS	$g \text{ DQO} \cdot m^{-3}$	TSS=(X <sub>S</sub> +X <sub>I</sub> +X <sub>BH</sub> +X <sub>BA</sub> +X <sub>P</sub> )*0,75



### 3. MATERIALS I MÈTODES

Una matriu incorporada a la taula 3.5 mostra les relacions estequiomètriques d'aquestes variables d'estat. L'ús d'aquesta representació facilita la identificació dels diferents paràmetres que intervenen en el model.

Taula 3.5: Notació matricial del creixement heterotròfic en medi aerobi.

→ continuïtat

<b>COMPONENTS</b> → <i>i</i>	<b>1</b> <i>X<sub>b</sub></i>	<b>2</b> <i>S<sub>s</sub></i>	<b>3</b> <i>S<sub>o</sub></i>	<b>Taxes de reacció,</b> $\rho_i$ (ML <sup>-3</sup> T <sup>-1</sup> )
<b>PROCESSOS</b> <i>j</i> ↓				
<b>1 Creixement</b>	1	- 1/ $\gamma$	- (1 - $\gamma$ ) / ( $\gamma$ )	$\frac{\mu \max S_s}{K_s + S_s} (X_b)$
<b>2 Descens</b>	-1		-1	$b X_B$
<b>TAXA DE CONVERSIÓ TOTAL OBSERVADA</b>	$\rho_{i \text{ neta}} = \sum v_{ji} \rho_i$			
<u>Paràmetres Estequiomètrics</u>				<u>Paràmetres cinètics</u>
<i>Coefficient de creixement .. <math>\gamma</math></i>				<i>Taxa de creixement específic max. .... <math>\mu</math></i>
				<i>Constant de <math>\frac{1}{2}</math> Saturació ..... <math>K_s</math></i>
	<i>Biomassa</i> <i>M (DQO) L<sup>-3</sup></i>	<i>Substrat</i> <i>M (DQO) L<sup>-3</sup></i>	<i>Oxigen</i> <i>(DQO negatiu) L<sup>-3</sup></i>	<i>Taxa específica de decaïment ..... <math>b</math></i>

Balanz Màssic

Els components "i" corresponen a les variables d'estat: fracció de biomassa, substrat soluble i oxigen dissolt. Els components "j" fan esment al creixement bacterià i al seu decaïment. En el centre de la matriu hi figuren els coeficients estequiomètrics  $\gamma_{ji}$  de cada procés "J" respecte de cada component "i". Finalment en la darrera columna hi consta l'expressió de la llei de velocitat per a cada procés  $\rho_j$ .

A partir de la matriu definida per l'ASM1 de la taula es pot conèixer el balanç de matèria de cadascuna de les variables d'estat considerades en el model.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

---

Dins del sistema, la concentració d'un component es pot veure afectada per part de diferents processos. La importància de la representació matricial radica en la ràpida detecció de cadascun dels components per al plantejament del balanç de matèria.

Aquest es pot observar descendint de forma vertical en la columna de cada component. L'equació bàsica per el balanç de masses per a qualsevol sistema definit és:

$$ENTRADES - SORTIDES + REACCIÓ = ACUMULACIÓ$$

Els termes d'entrada i de sortida són termes convectius i dependran dels corrents que entren i surten del sistema. El terme reacció  $r_i$ , s'obté de la suma de productes dels coeficients estequiomètrics  $v_{ij}$  i de la velocitat del procés  $\rho_j$  de cada component  $i$  considerat en el balanç de masses:

$$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j \quad (3.1)$$

Per exemple, la velocitat de reacció  $r$  per a la biomassa  $X_b$  en un punt del sistema seria:

$$r_{X_B} = \frac{\hat{\mu} S_s}{K_s + S_s} X_B - bX_b \quad (3.2)$$

Mentre que pel substrat soluble  $S_s$  :

$$r_{S_s} = -\frac{1}{Y} \frac{\hat{\mu} S_s}{K_s + S_s} X_B \quad (3.3)$$

I per l'oxigen dissolt  $S_o$  :

$$r_{S_o} = -\left(\frac{1-Y}{Y}\right) \frac{\hat{\mu} S_s}{K_s + S_s} X_B - bX_b \quad (3.4)$$

Per plantejar un balanç de matèria per a cada component, una vegada definits els límits del sistema (per exemple un reactor perfectament agiata) el grau de conversió es pot combinar amb termes apropiats com per exemple el flux per aquest sistema en particular. (Henze et al.,2002)

### 3. MATERIALS I MÈTODES

Taula 3.6: Matriu de Petersen per al model biològic ASM1 (Henze et al., 1987).

Components (i) / Procés (j)	S <sub>1</sub>	S <sub>5</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>BH</sub>	X <sub>BA</sub>	X <sub>p</sub>	S <sub>o</sub>	S <sub>NO</sub>	S <sub>NH</sub>	S <sub>ND</sub>	X <sub>ND</sub>	S <sub>ALK</sub>	Velocitat de reacció (p <sub>i</sub> )
1. Creixement aerobi heteròtrofs		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{XB}$			$-\frac{i_{XB}}{14}$	$\mu_{mH} \left( \frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left( \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) X_{BH}$
2. Creixement anòxic heteròtrofs		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{2.86Y_H}$		$-i_{XB}$			$-\frac{1-Y_H}{14 * 2.86Y_H} - \frac{i_{XB}}{14}$	$\mu_{mH} \left( \frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left( \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left( \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) * \eta_R X_{BH}$
3. Creixement aerobi autòtrofs						1		$\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB} \frac{1}{Y_A}$			$-\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7Y_A}$	$\mu_{mA} \left( \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left( \frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) X_{BA}$
4. Decaïment heteròtrofs				$1 - f_p$	-1		$f_p$					$I_{XB} - f_p i_{XP}$		$b_H \cdot X_{BH}$
5. Decaïment autòtrofs				$1 - f_p$		-1	$f_p$					$I_{XB} - f_p i_{XP}$		$b_A \cdot X_{BA}$
6. Etapa d'amonificació										1	-1		$\frac{1}{14}$	$K_a S_{ND} X_{BH}$
7. Etapa hidròlisi Components orgànics		1		-1										$K_H \left( \frac{X_S / X_{BH}}{K_X + X_S / X_{BH}} \right) \left( \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + \eta_h \left( \frac{k_{OH}}{k_{OH} + S_O} \right) \left( \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) * X_{BH}$
8. Hidròlisi del nitrogen org.												-1		$r_i (X_{ND} / X_S)$
	Matèria orgànica soluble inert	Substrat fàcilment biodegradable	Matèria orgànica particulada inert	Substrat lentament biodegradable	Biomassa heteròtrofa activa	Biomassa autòtrofa activa	Partícules no biodeg. del decaïment de la biomassa	Oxigen (DQO negativa)	Formes oxidades del nitrogen (nitrit i nitrat)	Nitrogen (NH <sub>3</sub> i NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Nitrogen orgànic biodegradable soluble	Nitrogen orgànic particulat biodeg.	Alcalinitat	

## 3. MATERIALS I MÈTODES

---

### 3.2.1.1. ALTERNATIVES ALS VALORS DE LES CONSTANT CINÈTIQUES I

#### ESTEQUIOMÈTRIQUES

Recentment, Hauduc et al. (2010) van du a terme una investigació aplicada sobre l'ús potencial d'una base de dades relacionada amb diferents valors de les constants cinètiques i estequiomètriques utilitzades en el calibratge de les EDAR. Aquest estudi es basa en l'experiència d'un centenar d'experts modeladors procedents d'àmbits tan diversos com: universitats públiques, centres de recerca, organitzacions governamentals i companyies privades d'arreu del món. Un 57% de la totalitat dels experts treballaven amb el model ASM1, la qual cosa corrobora que probablement aquest és el model biològic més utilitzat. Hauduc en la seva investigació va detectar que la taxa de creixement màxim i la taxa de decaïment dels microorganismes autòtrofs eren sovint modificades i que alguns estudis mostraven que fixar el valor de decaïment dels microorganismes autòtrofs a  $0,17 \text{ d}^{-1}$  en comptes del valor de  $0,10 \text{ d}^{-1}$  proposat pel model permetia no haver de modificar la seva taxa de creixement en cas de variació de l'edat dels fangs. Per altra banda, alguns experts havien modificat l'estructura del model introduint un rendiment dels heteròtrofs més baix en condicions anòxiques ( $0,54 \text{ g } X_{\text{OHO}} \cdot \text{g } X_{\text{CB}}^{-1}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ ). En la base de dades recollida, tres altres paràmetres es varen mostrar també importants respecte dels seus canvis. Eren els coeficients de semi-saturació de la matèria orgànica biodegradable soluble per als heteròtrofs, el coeficient de semi-saturació de la fracció oxidada del nitrogen per als heteròtrofs i el coeficient de semi-saturació de la fracció de l'amoni per als autòtrofs, que guardaven una forta relació amb les condicions mediambientals. La recopilació d'aquestes dades utilitzades a la pràctica del modelatge de plantes així com l'experiència dels modeladors va permetre elaborar un nou rang de valors per a les constants biocinètiques que dona més marge als valors per defecte proposats inicialment. La relació d'aquest nou rang de valors, estandarditzats a la temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  i corresponents als paràmetres biocinètics modificables es troba resumida a la taula 3.7.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

Taula 3.7: Relació de paràmetres modificats per al model ASM1, estandarditzats a 20°C. (Hauduc et al., 2011).

Paràmetre	Unitat	Descripció	Conjunt de paràmetres originals		Conjunt de paràmetres optimitzats					Proposta de nous valors dels paràmetres per defecte	
			Notació	Valor (a)	Modificació n>50%	Med.	Perc. 25%	Perc. 75%	V %	Conjunt de paràmetres: b/c/d/e/f/g/h/i	
<b>Paràmetres estequiomètrics</b>											
$Y_{OHO}$	$g_{X_{OHO}} \cdot g_{X_{CB}}^{-1}$	Producció per creixement $X_{OHO}$	$Y_H$	0,67	26	X	0,67	0,62	0,67	7	0,6 (c.;i) $Y_{OHO,OX} : 0,67$ i $Y_{OHO,AX}:0,54$ (b;f;h)
<b>Coefficient de conversió</b>											
$i_N$	$X_{Bio}$	N contingut en la biomassa ( $X_{OHO}$ , $X_{ANO}$ )	$I_{XB}$	0,086	31		0,086	0,079	0,086	8	0,08(c ; g)
<b>Paràmetres cinètics</b>											
<b>Hidròlisi</b>											
$q_{XCB\_SB, hid}$	$g_{X_{CB}} \cdot g_{X_{OHO}}^{-1} \cdot d^{-1}$	Taxa màxima d'hidròlisi específica	$k_h$	3	31		3	2,2	3	26	2(c)/2,21(i)/5,2(g)
$\theta_{q_{XCB\_SB, hid}}$	-	Fact. correcció temp. per a $q_{XCB\_SB, hid}$	$\theta_{kh}$	1,116	11	X	1,116	1,072	1,12	4	1,072 (f)
$K_{XCB, hid}$	$g_{X_{CB}} \cdot g_{X_{OHO}}^{-1}$	Coef. de semi-saturació per a $X_{CB}/X_{OHO}$	$K_X$	0,03	30		0,03	0,03	0,03	0	0,02(c)/0,17(g)/0,15(i)
$\theta_{K_{XCB, hid}}$	-	Fact. correcció temp. per a $K_{XCB, hid}$	$\theta_{KX}$	1,116	10	X	1,116	1,116	1,12	0	1 (f)
$\eta_{qhv_d, Ax}$	-	Fact. correcció hidròl. cond. anòxiques	$\eta_h$	0,4	31		0,4	0,4	0,5	25	0,5(g)/0,6(d) $\eta_{qhv_d, An}:0,75$ (d)
<b>Microorganismes heterotròfs ordinaris</b>											
$\mu_{OHO, max}$	$d^{-1}$	Taxa màxima de creixement per $X_{OHO}$	$\mu_H$	6	31		6	5,7	6	6	4(d)/5,7(g)
$\theta_{\mu_{OHO, max}}$	-	Fact. correcció temp. per a $\mu_{OHO, max}$	$\theta_{\mu H}$	1,072	11	X	1,072	1,071	1,09	2	
$\eta_{\mu_{OHO, Ax}}$	-	Factor reducc. creixement anòx. per a $X_{OHO}$	$\eta_g$	0,8	31		0,8	0,8	0,8	0	0,6(c)
$K_{S_B, OHO}$	$g_{S_B} \cdot m^{-3}$	Coeficient de semi-saturació per a $S_B$	$K_S$	20	31		20	10	20	50	5(d)/10(g)
$b_{OHO}$	$d^{-1}$	Taxa de decaïment per a $X_{OHO}$	$b_H$	0,62	31		0,62	0,61	0,62	2	0,4(d)/0,41(i)/0,5(c)/0,53(g)
$\theta_{b_{OHO}}$	-	Fact. correcció temp. per a $b_{OHO}$	$\theta_{bH}$	1,12	11	X	1,1	1,029	1,12	8	1,029(f)/1,071(c;d)
$K_{O_2, OHO}$	$g_{SO_2} \cdot m^{-3}$	Coeficient de semi-saturació per a $SO_2$	$K_{OH}$	0,2	31		0,2	0,2	0,2	0	0,05(f)/0,1(i)
$K_{NO_3, OHO}$	$g_{SNO_3} \cdot m^{-3}$	Coeficient de semi-saturació per a $SNO_3$	$K_{NO}$	0,5	0,1		0,5	0,1	0,5	80	0,1(f)/0,2(i)
<b>Microorganismes autòtrofs nitrificants</b>											
$\mu_{ANO, max}$	$d^{-1}$	Màxim grau de creixement per a $X_{ANO}$	$\mu_A$	0,8	30	X	0,8	0,66	0,9	30	0,77(i)/0,82(g)/0,85(c)/0,9(b;d)
$\theta_{\mu_{ANO, max}}$	-	Fact. Correcció temperatura per a $\mu_{ANO, Max}$	$\theta_{\mu A}$	1,103	14	X	1,103	1,059	1,11	5	1,059(f;h)/1,072(b)
$b_{ANO}$	$d^{-1}$	Taxa de decaïment per a $X_{ANO}$	$b_A$	0,5-0,15	30	X	0,1	0,08	0,15	70	0,07(g)/0,096(i)/0,17(b;f;h)
$\theta_{b_{ANO}}$	-	Fact. correcció temperatura per a $b_{ANO}$	$\theta_{bA}$	1,072	12	X	1,07	1,029	1,072	4	1,027(f;h)/1,083(d)/1,103(c)
$q_{am}$	$m^3 \cdot g_{X_{CBN}}^{-1} \cdot d^{-1}$	Cte. de velocitat de amonificació	$K_a$	0,08	29		0,08	0,07	0,08	12	0,05(g)/0,16(i)
$\theta_{q_{am}}$	-	Fact. Correcció temperatura per a $q_{am}$	$\theta_{KA}$	1,072	11		1,07	1,07	1,07	0	1,071(d;c)
$K_{O_2, ANO}$	$g_{SO_2} \cdot m^{-3}$	Coeficient de semi-saturació per a $SO_2$	$K_{OA}$	0,4	31		0,4	0,4	0,4	0	0,2(f)/0,5(c)/0,75(i)
$K_{NH_4, ANO}$	$g_{SNH_4} \cdot m^{-3}$	Coeficient de semi-saturació per a $SNH_4$	$K_{NH}$	1	31		1	0,75	1	25	0,1(f)/0,5(d)

Henze(2000): (a) / respostes dels modeladors: (b) , (c) / Bornemann et al. (1998): (d) / Hulsbeek et al.(2002): (e) / Marquot (2006): (f) / Spanjers et al. (1998): (g) /Choubert et al. (2009b): (h) / Grady et al.(1999): (i)

### 3. MATERIALS I MÈTODES

---

Petersen corresponent a la taula 3.10 mostra la totalitat de components i de processos biològics que presenta el model. És una forma estructurada de mostrar els elements bàsics del model i la seva interrelació.

#### 3.2.2. MODEL DE SEDIMENTACIÓ

El model de sedimentació que adopta el model ASM1 dins del protocol *Benchmark* correspon al model de Takács (1991), que inclou una doble funció de la velocitat exponencial i es basa en el concepte de flux de sòlids. Aquest model és aplicable en condicions de sedimentació i de compactació. Utilitza una sèrie de paràmetres definits a la taula 3.8 a on es contempla la descripció de cada paràmetre, el símbol associat i les unitats.

$$V_{sj} = (V_o)(e)^{-r_h \cdot x_j^*} - (V_o)(e)^{-r_p \cdot x_j^*} \quad (3.5)$$

$$0 \leq V_{sj} \leq V_o'$$

Essent:

$V_{sj}$  = velocitat de sedimentació en la capa j ( m.d<sup>-1</sup>).

$X_j^*$  = concentració dels sòlids en suspensió a la capa "j" ( g. m<sup>-3</sup>) i subjecte a les condicions limitants de ( $X_j^* = X_j - X_{\min}$ ).

$X_j$  = concentració dels sòlids en suspensió en la capa "j" (g. m<sup>-3</sup>).

$X_{\min}$  = mínim assolible de sòlids en suspensió (g. m<sup>-3</sup>) calculats a partir de:

$$X_{\min} = f_{ns} \times x_{in}$$

on:

$x_{in}$  = concentració de TSS en el licor mixt d'entrada al sedimentador i

$f_{ns}$  = fracció no sedimentable.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

Taula 3.8: Model de sedimentació. Paràmetres i valors per defecte.

DESCRIPCIÓ DEL PARÀMETRE	SÍMBOL	VALOR	UNITATS
Màx. velocitat de sedimentació	$V_o'$	250	m·d <sup>-1</sup>
Màx velocitat de sedim. Vesilind	$V_o$	474	m·d <sup>-1</sup>
Paràmetre sedimentació zona compactada	$r_h$	0,000576	m <sup>3</sup> ·(g TSS) <sup>-1</sup>
Paràmetre floc. zona sedimentada	$r_p$	0,00286	m <sup>3</sup> ·(g TSS) <sup>-1</sup>
Fracció no sedimentable	$f_{ns}$	0,00228	adimensional

#### 3.2.3. CRITERIS D' AVALUACIÓ

Els criteris d'avaluació utilitzats són els proposats per (Coop, 2002), incorporats al model ASM1 i capaços de quantificar l'efecte de l'estratègia de control aplicada a l'EDAR. Aquests es poden agrupar en tres subnivells:

- Índex de qualitat de l'efluent.
- Incompliments de l'efluent.
- Costos operacionals.

Abans de descriure l'expressió de càlcul que el model utilitza per aquests subnivells, es fa necessari presentar la definició de les diferents variables implicades. Aquestes variables i el seu corresponent càlcul s'inclouen a la taula 3.9.

Taula 3.9: Definició del càlcul de les variables compostes en el model ASM1.

Variable (efluent)	Fórmula de càlcul
<b>TSS</b>	$0,75 * (X_{S,e} + X_{BH,e} + X_{BA,e} + X_{P,e} + X_{I,e})$
<b>COD</b>	$S_{S,e} + S_{I,e} + X_{S,e} + X_{BH,e} + X_{BA,e} + X_{P,e} + X_{I,e}$
<b>BOD</b>	$0,25 * (S_{S,e} + X_{S,e} + (1 - f_p) * (X_{BH,e} + X_{BA,e}))$
<b>TKN</b>	$S_{NH,e} + S_{ND,e} + X_{ND,e} + i_{XB} (X_{BH,e} + X_{BA,e}) + i_{XP} (X_{P,e} + X_{I,e})$
<b>NO</b>	$S_{NO,e}$
<b>N total</b>	$TKN_e + NO_e$

### 3. MATERIALS I MÈTODES

- Índex de qualitat de l'efluent

Aquest terme ve expressat amb les unitats de kg de contaminant que conté l'efluent i que és abocat al medi receptor per dia (kg contaminant·d<sup>-1</sup>). El model el calcula a partir de l'expressió (3.6) per integració dels valors obtinguts en els darrers 7 dies de la simulació.

$$EQ = \frac{1}{T * 1000} \int_{t_0}^{t_0 + 7 \text{ dies}} [PU_{TSS}(t) + PU_{COD}(t) + PU_{BOD}(t) + PU_{TKN}(t) + PU_{NO}(t)] Q_e(t) dt \quad (3.6)$$

on :

$$PU_{TSS} = \beta_{TSS} TSS_e(t) \quad \beta_{TSS} = 2$$

$$PU_{COD} = \beta_{COD} COD_e(t) \quad \beta_{COD} = 1$$

$$PU_{BOD} = \beta_{BOD} BOD_e(t) \quad \beta_{BOD} = 2$$

$$PU_{TKN} = \beta_{TKN} TKN_e(t) \quad \beta_{TKN} = 20$$

$$PU_{NO} = \beta_{NO} NO_e(t) \quad \beta_{NO} = 20$$

De la mateixa manera que el model calcula la qualitat de l'efluent (EQ), també pot calcular la qualitat de l'influent (IQ) utilitzant els paràmetres TSS, DQO, DBO, TKN i NO a partir de les mateixes equacions Ara bé, cal tenir en compte que per valorar la DBO en l'influent el coeficient 0,25 que acompanya al càlcul s'ha de substituir per 0,65, ja que la proporció de matèria orgànica és lògicament més elevada en aquest.

- Incompliments de l'efluent

Per a la valoració del compliment legal de l'efluent, el model aplica les restriccions associades a cinc termes: l'amoni, el nitrogen total, el BOD, el COD i els TSS. S'utilitzen com a valors límit per aquests termes els que figuren a la taula 3.10.

Taula 3.10: Valors límit aplicats en el model ASM1.

		Valors límit adoptats en el efluent	Unitats
Amoni	$S_{NH,e}$	4	g N·m <sup>-3</sup>
Nitrogen total	$N_{total,e}$	18	g N·m <sup>-3</sup>
BOD <sub>5</sub>	$BOD_e$	10	g BOD·m <sup>-3</sup>
Total COD	$COD_e$	100	g COD·m <sup>-3</sup>
Sòlids en suspensió totals	$TSS_e$	30	g SS·m <sup>-3</sup>



### 3. MATERIALS I MÈTODES

Els incompliments de l'efluent venen expressats de dues maneres:

- El nombre de violacions o vegades que algun dels paràmetres sobrepassa el valor límit.
- El percentatge respecte del temps avaluat en què la planta es troba incomplint aquests valors límit.

Aquest darrer terme dona una informació addicional important, ja que el nombre de violacions no reflecteix el percentatge de temps en què la planta es troba sobrepassant els valors límit.

- Costos operacionals

Les variables operacionals són avaluades a partir de tres paràmetres: la producció de fangs, l'energia de bombament i l'energia d'aeració.

- La producció de fangs inclou els fangs destinats a tractament i el total de fangs produïts. Les equacions de càlcul es defineixen a continuació..

a) Fangs destinats a tractament (amb unitats de  $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ )

$$P_{fangs} = \left[ \Delta M(TSS_{sistema}) + M(TSS_{efluent}) \right] / T \quad (3.7)$$

essent:

$\Delta M(TSS_{sistema})$ : variació de massa de fangs que ha experimentat el sistema en l'interval de temps avaluat.

$$\Delta M(TSS_{sistema}) = \Delta M(TSS_{sistema})_{t=t} - \Delta M(TSS_{sistema})_{t=0} \quad (3.8)$$

$$\Delta M(TSS_{sistema}) = M(TSS_{reactor/s}) + M(TSS_{se\ dim entador}) \quad (3.9)$$

$$M(TSS_w) = 0,75 \int_{t=0}^{t=7(\text{dies})} \left[ X_{S,w}(t) + X_{BH,w}(t) + X_{BA,w}(t) + X_{P,w}(t) + X_{I,w}(t) \right] Q_w(t) dt \quad (3.10)$$

b) Producció total de fangs ( $\text{kg}\cdot\text{d}^{-1}$ )

$$P_{total\ fangs} = P_{fangs} + M(TSS_e) / T \quad (3.11)$$

### 3. MATERIALS I MÈTODES

---

on:

$$M(TSS_e) = 0,75 \int_{t=0}^{t=7(\text{dies})} [X_{S,e}(t) + X_{BH,e}(t) + X_{BA,e}(t) + X_{P,e}(t) + X_{I,e}(t)] Q_e(t) dt \quad (3.12)$$

- Energia de bombament i energia d'aeració.

L'energia de bombament ( $\text{kWh}\cdot\text{d}^{-1}$ ) és calculada amb a partir de l'equació següent:

$$PE = \frac{0,04}{T} \int_{t=0}^{t=7(\text{dies})} [Q_a(t) + Q_r(t) + Q_w(t)] dt \quad (3.13)$$

essent:

$Q_a(t)$ : cabal de recirculació interna a temps  $t$  ( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ )

$Q_r(t)$ : cabal de recirculació de fangs a temps  $t$  ( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ )

$Q_w(t)$ : cabal de purga de fangs a temps  $t$  ( $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ )

El consum d'energia destinada a l'aeració ( $\text{kWh}\cdot\text{d}^{-1}$ ) es calcula a partir de:

$$AE = \frac{24}{T} \int_{t=0}^{t=7(\text{dies})} \sum_{i=1}^{i=5} [0,4032 K_L a_i(t)^2 + 7,8408 K_L a_i(t)] dt \quad (3.14)$$

on:

$K_L a_i(t)$ : coeficient global de transferència d'oxigen en el reactor airejat en el temps  $t$  en unitats de  $\text{t}^{-1}$  (Copp, 2002).

#### 3.2.3.1. MÒDUL INSPECTOR

Paral·lelament a aquestes avaluacions s'ha desplegat una programació addicional, o mòdul inspector, que complementa la informació abans esmentada i que avalua el grau de compliment de l'EDAR respecte de la legislació vigent, calculant el percentatge de probabilitat d'incompliments que l'EDAR pot presentar sota determinats escenaris sotmesos a simulació. La utilització d'aquesta informació és important a l'hora d'assumir riscos i per tant es pot considerar una eina de suport a la presa de decisions.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

S'ha de tenir en compte, però, que el programa s'ha d'adaptar a l'EDAR sotmesa a estudi, ja que la legislació diferencia el nombre de mostres i el límit d'acceptació d'incompliments en funció de la capacitat de la planta. En el cas de l'EDAR de la Vall del Ges, la Directiva 91/271/CEE determina un nombre de mostres anuals de 12 i nombre màxim d'incompliments totals de 2 (corresponents a una planta amb capacitat de tractament per a 42000 h.eq.), amb restriccions d'abocament inclosos a la taula 3.11. Aquests valors són els introduïts en el mòdul amb la finalitat de ser contrastats amb els resultats obtinguts de les simulacions.

Taula 3.11: Límits legislatius d'abocament de les EDAR en zones declarades com a sensibles (tractament secundari o procés equivalent).

PARÀMETRE	CONCENTRACIÓ	LÍMIT MÍNIM DE REDUCCIÓ
DBO <sub>5</sub>	25 mg·L <sup>-1</sup> d'O <sub>2</sub>	70-90%
DQO	125 mg·L <sup>-1</sup> d'O <sub>2</sub>	75%
Total Sòlids en Suspensió	35 mg·L <sup>-1</sup>	90%
Fòsfor total	2 mg·L <sup>-1</sup> de P 10000 a 100000 h-eq. 1 mg·L <sup>-1</sup> P per > 100000 h-eq.	80%
Nitrogen total (*)	15 mg·L <sup>-1</sup> d'N 10000 a 100000 h-eq. 10 mg·L <sup>-1</sup> d'N per > 100000 h-eq.	70-80%

(\*) Nitrogen total equivalent a la suma de nitrogen Kjeldhal total (N orgànic + N amoniacal), nitrogen en forma de nitrat i nitrogen en forma de nitrit .

El mòdul executa l'avaluació de 1000 lots de 12 mostres integrades efectuades aleatòriament al llarg de l'any. De cada lot de 12 mostres integrades, s'obté una mitjana de valors sobre 24 hores respecte dels paràmetres legiscats, els quals, són simultàniament comparats amb els valors límit de la planta i el programa en calcula els incompliments i aquests són comparats amb el nombre d'incompliments permesos. Els resultats queden reflectits en una gràfica, tal com es pot observar en la figura 3.6. D'acord amb aquests resultats el programa ofereix directament el càlcul del percentatge de risc d'incompliments.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

---

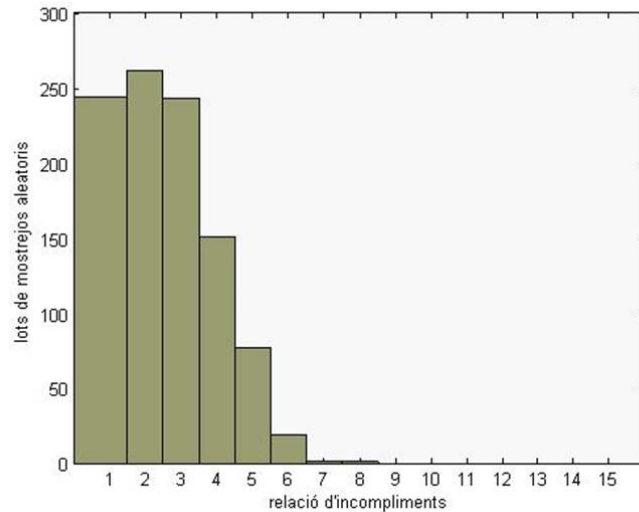


Figura 3.6: Exemple gràfic d'avaluació dels incompliments.

En aquest exemple, extret d'una simulació en dinàmic de la planta treballant sense cap tipus de control (*open-loop*), es pot observar el nombre d'incompliments per als lots de 12 mostrejos aleatoris efectuats (amb un total de 1000 lots)\*

(\*) El nombre de lots dels mostrejos (1000) s'ha seleccionat per tal que sigui prou representatiu a fi d'assegurar les diferents casuístiques que es puguin presentar, es a dir, mostrejos que puguin tenir lloc en diferents èpoques de l'any o bé abastar un ampli ventall de possibilitats (mostrejos efectuats en intervals molt separats o bé molt propers) i d'aquesta manera poder quantificar la incertesa associada a la selecció de les dates dels mostrejos).

En aquest cas, un total d'aproximadament 242 lots de 12 mostrejos presentarien 1 incompliment i uns 265, 2 incompliments. Aquest total de lots avaluats (507) serien lots acceptables per aquesta EDAR (màxim nombre d'incompliments 2). Mentre que la resta (245 lots amb 3 incompliments, 149 amb 4, 75 amb 5, 18 amb 6, 2 amb 7, 2 amb 8 i 2 amb 9), conformarien un total de 493 lots que no serien acceptables per superar el nombre màxim establert per la legislació, el que suposaria, en l'exemple presentat, que el risc d'incompliment es trobaria al voltant d'un 50%.

Aquesta matriu suporta la presa de decisions a l'hora d'assumir riscos sobre els possibles incompliments.

## 3. MATERIALS I MÈTODES

---

### 3.3. METODOLOGIA PER AL CALIBRATGE D'UNA EDAR

Els models de fangs activats, i entre ells l'ASM1 en particular, són reconeguts com a eines útils per a la representació matemàtica dels processos que tenen lloc en les plantes depuradores d'aigües residuals. No obstant això, la utilització d'aquests models a partir de simulacions, utilitzant plataformes informàtiques, requereix d'una acurada metodologia per assolir un bon calibratge (Marquot et al., 2006).

#### 3.3.1. PROTOCOL DE CALIBRATGE

Per tal d'efectuar el calibratge de l'EDAR és aconsellable seguir un protocol que doni informació suficient sobre les diferents etapes a seguir. El protocol més utilitzat és el del *Good Modelling Practice* (GMP), desenvolupat per l'IWA Task Group. Aquest protocol combina aspectes clau seguint una estructura general seleccionada en concordança amb els conceptes generals de calibratge.

La relació entre les diferents etapes es mostra a la figura 3.7. Tal com es pot observar, el protocol consta de 5 etapes principals:

- Definició del projecte.
- Adquisició i conciliació de dades.
- Construcció del model.
- Calibratge i validació.
- Simulació i interpretació dels resultats.

Cada etapa ha d'ésser revisada i acceptada per les parts involucrades (caps de planta i modeladors) abans de portar a terme l'etapa següent (corresponent a les caixes de decisió blaves del protocol presentat en la figura 3.7).

##### 3.3.1.1. DEFINICIÓ DEL PROJECTE

En aquesta etapa es defineixen els objectius del projecte de modelització, s'identifiquen les parts involucrades i la seva responsabilitat. També s'acorda el pressupost així com les restriccions a què pot estar sotmesa. Una vegada acordades les especificacions tècniques i la temporització s'elabora un document que defineix el projecte. Aquest document pot ésser modificat durant les tasques de revisió. Per tant es considera un document dinàmic.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

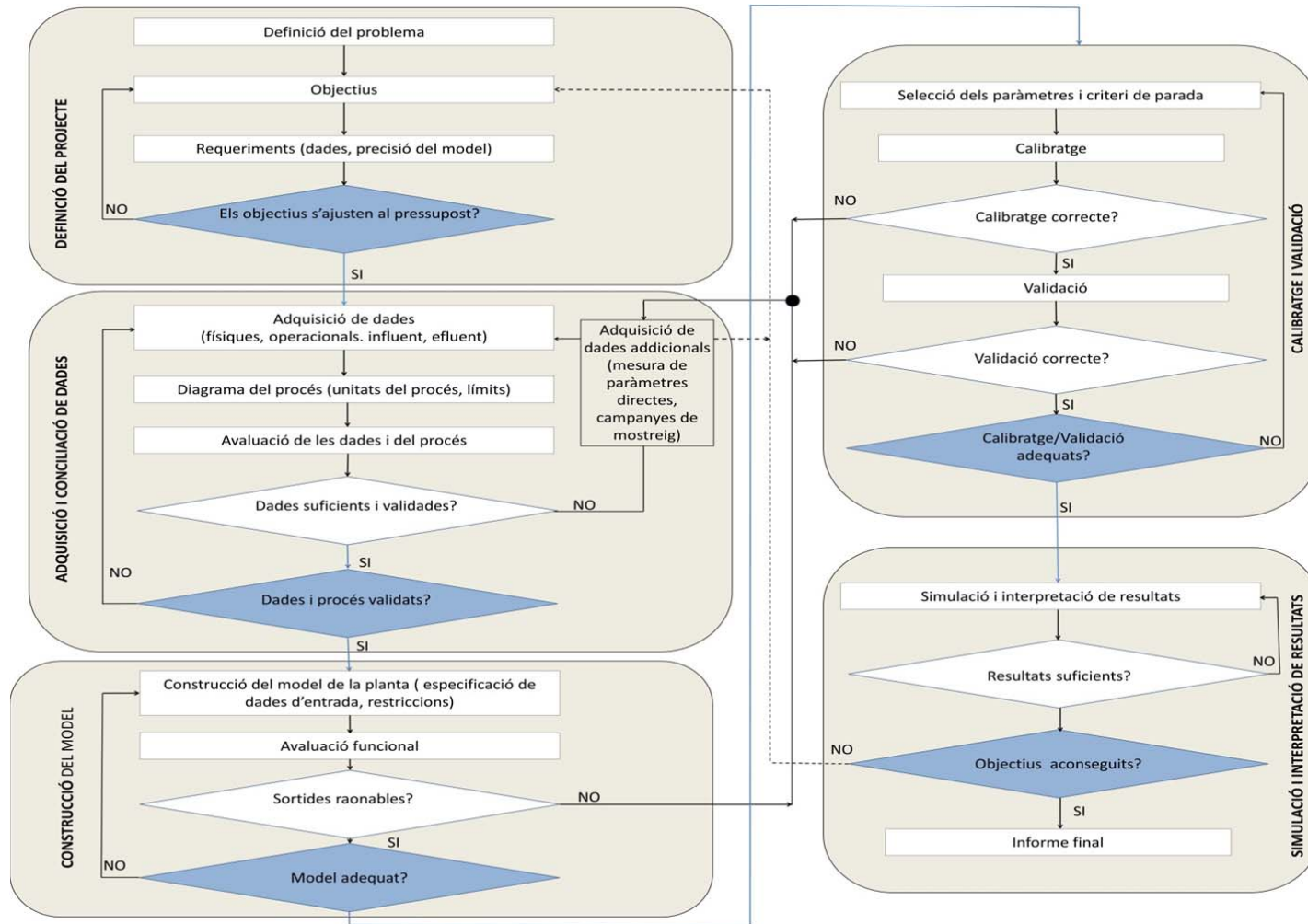


Figura 3.7: Esquema del protocol de calibratge GMP.

## 3. MATERIALS I MÈTODES

---

### 3.3.1.2. ADQUISICIÓ I CONCILIACIÓ DE DADES

Aquesta etapa pretén aconseguir la recopilació, la valoració i, si és necessari la conciliació de dades per al projecte de simulació. El procediment de l'etapa es basa en les analítiques històriques de l'EDAR incloent-hi mètodes basats en anàlisi estadística, experiència en enginyeria i balanços de massa. Els resultats d'aquesta etapa seran conciliats per tal d'utilitzar-se en les etapes següents del projecte de simulació establert. Qualsevol desviació del projecte original haurà d'ésser identificat, havent-se d'establir les modificacions corresponents abans de passar a l'etapa següent.

### 3.3.1.3. CONSTRUCCIÓ DEL MODEL

Consisteix en la construcció del model de planta, traduint les dades reals a una descripció matemàtica simplificada de la realitat. Inclou la selecció de la distribució del model, l'estructura dels sub-models, les connexions a les bases de dades i la creació de taules i gràfics de sortida del model. La configuració del model de planta precisa efectuar comprovacions de la funcionalitat general del model a fi de garantir l'obtenció de resultats raonables. Una vegada construït, s'elabora un informe del model de planta generat i s'identifiquen les desviacions respecte del projecte original. Les modificacions sobre la definició d'aquest projecte original s'han d'efectuar abans de passar a l'etapa següent.

### 3.3.1.4. CALIBRATGE I VALIDACIÓ

El procés de calibratge és l'etapa on es modifiquen els paràmetres d'entrada fins que els resultats de la simulació coincideixin el màxim possible amb les dades observades. La simulació en estat estacionari és el primer pas per al calibratge del model. En aquesta simulació s'utilitzen generalment, com a influent d'entrada, les diferents fraccions calculades a partir de la mitjana dels valors anuals de l'històric de la planta.

Les dades utilitzades en aquesta etapa són doncs els valors mitjans obtinguts de la pròpia planta de tractament. Els paràmetres més rellevants a determinar són  $Y_H$ ,  $f_p$ ,  $b_H$  i  $X_I$  en l'influent (Petersen et al., 2002). Aquests paràmetres es troben d'alguna manera relacionats. Segons estudis efectuats,  $Y_H$  i  $f_p$  són valors fixats, mentre que  $b_H$  i  $X_I$  són ajustats durant el procés de calibratge en condicions estacionàries. Aquesta simulació resulta molt útil per a la determinació de les condicions inicials de l'estat dinàmic. El calibratge del model dinàmic s'utilitza per descriure i predir els ràpids canvis d'una situació dinàmica, com poden ser les variacions de cabals i composicions d'entrada a l'EDAR. Segons Petersen et al. (2002), la funció més important del calibratge dinàmic és estimar els paràmetres que prediuen situacions dinàmiques. Aquests paràmetres

### 3. MATERIALS I MÈTODES

---

són els rangs de creixement específic  $\mu_A$  i  $\mu_H$ . Es precisa d'una sèrie de dades per al calibratge en dinàmic que es realitza a partir de les mostres recollides en l'EDAR. Sovint s'efectua una campanya de presa de mostres que ha d'ésser portada a terme amb una freqüència de mostreig correcta. La freqüència que s'ha d'escollir ha d'ésser al menys 5 vegades més ràpida que el temps de retenció hidràulic i la durada de la campanya ha d'ésser de 3 a 4 vegades aquest temps. Tot i que a vegades aquestes pautes no poden ser del tot suficients i es fa necessari utilitzar les dades a escala de laboratori de la pròpia planta per obtenir la informació necessària. El procés està completat quan els resultats de la simulació presenten un error acceptable respecte de les dades mesurades. Les proves de validació es porten a terme amb la finalitat d'assegurar la utilització del model de planta amb el nivell de confiança necessari per acomplir els objectius de la modelització.

#### 3.3.1.5. SIMULACIÓ I INTERPRETACIÓ DELS RESULTATS

El model de planta calibrat i validat s'utilitza per efectuar les simulacions a fi d'assolir els objectius plantejats inicialment i definits en el projecte. Aquesta etapa inclou la definició d'escenaris, les simulacions, la presentació i interpretació de resultats per tal de documentar tota la informació considerada com a essencial. L'etapa finalitza quan el modelador i els agents implicats acorden que les expectatives de la definició del projecte han estat aconseguides (Rieger et al., 2013).

#### 3.4. ANÀLISI DE SENSIBILITAT

Les anàlisis de sensibilitat (SA) poden ser considerades com una eina important en els processos de modelatge, aportant criteris objectius a l'hora d'avaluar les diferents etapes que l'integren i, de manera específica, el calibratge del model (Saltelli et al., 2000).

##### 3.4.1. ANÀLISI DE SENSIBILITAT GLOBAL

Com que molts models de simulació són complexos, amb multitud de paràmetres, variables d'estat i relacions no lineals, els models presenten sovint molts graus de llibertat. L'anàlisi de sensibilitat global és l'estudi de com les incerteses en les sortides del model, ja siguin numèriques o no, poden estar relacionades amb les diferents fonts d'incertesa de les pròpies entrades al model (Saltelli et al., 2004). Aquests autors recomanen per a l'aplicació de les anàlisis de sensibilitat global, la selecció del mètode més adequat, entre els quals es troben les mesures basades en la variància (Mètodes de filtrat de Morris i de Monte Carlo), com a mètodes efectius.



## 3. MATERIALS I MÈTODES

---

### 3.4.2. ANÀLISI DE SENSIBILITAT LOCAL.

Saltelli et al. (2004) van aplicar l'anàlisi de sensibilitat per valorar la importància relativa dels factors d'entrada d'un model matemàtic. Aplicat a un model biocinètic, l'anàlisi de sensibilitat aconsegueix detectar els paràmetres que tenen un impacte més gran en la simulació de l'activitat del reactor biològic. Les motivacions per desenvolupar un mètode que descriu les incerteses en l'avaluació dels coeficients de velocitat en reaccions bioquímiques es deu a la complexitat que presenten els actuals mètodes estadístics aplicats a l'anàlisi d'aquestes reaccions. Smith (1998) va avaluar les incerteses sobre les velocitats de reacció enzimàtica dels bacteris a partir de les comparacions obtingudes entre cultius i condicions ambientals.

L'anàlisi de sensibilitat local s'utilitza per avaluar la importància relativa dels factors d'entrada en un model local. S'aplica modificant un petit interval d'un paràmetre d'entrada en el model i s'avalua quina resposta té aquest canvi sobre les variables de sortida.

Existeixen dos tipus d'anàlisi de sensibilitat local i segons l'ús que se li vulgui donar, es pot utilitzar un tipus o l'altre.

- Funció de sensibilitat absoluta

Es defineix la sensibilitat absoluta d'una variable  $y_i$  respecte a les variacions del paràmetre  $p_j$ :

$$S_{i,j} = \left( \frac{\partial y_i}{\partial p_j} \right)_{y=y(t,\hat{p}), \dots, p=\hat{p}} \quad (3.15)$$

La derivada parcial s'avalua en el punt normal d'operació, on a tots els paràmetres se'ls assignen els seus valors nominals,  $p = \hat{p}$ . Les funcions de sensibilitat absoluta són útils per calcular els errors deguts a les variacions dels paràmetres i per conèixer el moment en què un paràmetre exerceix un major o menor efecte. Però les funcions absolutes no estan normalitzades i no són útils per comparar els efectes de diferents paràmetres. En aquests casos s'han d'utilitzar les funcions de sensibilitat relatives.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

---

- Funció de sensibilitat relativa

La sensibilitat relativa de la variable  $y_i$  respecte de les variacions del paràmetre  $p_j$  representa el percentatge de canvi en  $y_i$  respecte al canvi de  $p_j$ :

$$\bar{S}_{i,j} = \frac{\% \text{ de canvi en } y_i}{\% \text{ de canvi en } p_j} = \frac{p_j}{y_i} \left( \frac{\partial y_i}{\partial p_j} \right)_{y=y(t,\hat{p}), \dots, p=\hat{p}} \quad (3.16)$$

Les funcions de sensibilitat relativa es formen multiplicant la derivada parcial (funció de sensibilitat absoluta) per el valor nominal del paràmetre dividit pel valor de la variable. Són ideals per comparar paràmetres entre sí ja que són adimensionals (funcions normalitzades).

A més la funció de sensibilitat relativa presenta problemes de divisió per zero quan  $y_i$  és nul·la i proporciona ponderacions incorrectes a la resposta si el valors de  $y_0$  són petits. Per tant algunes vegades s'aconsella l'ús de la sensibilitat semi-relativa.

- Funció de sensibilitat semi-relativa

En aquest cas s'ha de distingir entre la sensibilitat de la variable  $y_i$  respecte a les variacions del paràmetre  $p_j$  relativa als valors de la variable, calculable a partir de:

$$\bar{S}_{i,j} = \frac{1}{y_i} \left( \frac{\partial y_i}{\partial p_j} \right)_{y=y(t,\hat{p}), \dots, p=\hat{p}} \quad (3.17)$$

i la sensibilitat de la variable  $y_i$  respecte de les variacions del paràmetre  $p_j$  relativa al valor del paràmetre:

$$\bar{S}_{i,j} = p_j \left( \frac{\partial y_i}{\partial p_j} \right)_{y=y(t,\hat{p}), \dots, p=\hat{p}} \quad (3.18)$$

Mentre que les funcions de sensibilitat semi-relativa respecte a les variables d'estat presenten la mateixa forma que les funcions de sensibilitat relatives (per tant les mateixes limitacions descrites a l'apartat anterior), les funcions de sensibilitat semi-relativa respecte als paràmetres tenen la mateixa forma que les funcions de sensibilitat

### 3. MATERIALS I MÈTODES

---

absoluta (estan multiplicades pels valors constants dels paràmetres). Per tant, permeten fer comparacions dels efectes dels diferents paràmetres (Karnavas, 1993).

#### 3.4.2.1. DESENVOLUPAMENT DE L'ANÀLISI DE SENSIBILITAT LOCAL

- 1) Per tal de calcular la funció de sensibilitat és necessària una simulació de referència, que genera una variable ( $Y_{ref}$ ), així com un paràmetre de referència ( $P_{ref}$ ) i una simulació pertorbada respecte de l'anomenat factor de pertorbació que genera una altra simulació amb un altra paràmetre ( $P_{pert}$ ) i una nova variable ( $Y_{pert}$ ), pertorbats. El càlcul de la funció de sensibilitat és la relació entre la diferència del valor de la variable pertorbada i la de referència i la diferència entre el paràmetre pertorbat i el de referència.

$$FS = \frac{\Delta Y}{\Delta P} = \frac{Y_{pert} - Y_{ref}}{P_{pert} - P_{ref}} \quad (3.19)$$

Per tal que la simulació referència-pertorbació doni corbes coincidents (la qual cosa assegura l'exactitud de l'anàlisi de sensibilitat), es poden ajustar els valors del factor de pertorbació i de control.

- 2) Per al càlcul de la funció de sensibilitat absoluta s'utilitza també l'equació:

$$FS_{abs} = \frac{\Delta Y}{\Delta P} = \frac{Y_{pert} - Y_{ref}}{P_{pert} - P_{ref}} \quad (3.20)$$

- 3) El càlcul de la funció de sensibilitat relativa proporciona els valors de comparació entre les diferents gràfiques de sensibilitat obtingudes establint uns resultats que són comparables entre ells.

$$FS_{rel} = \frac{\Delta Y}{\Delta P} * \frac{P}{Y} = \frac{Y_{pert} - Y_{ref}}{P_{pert} - P_{ref}} * \frac{P}{Y} \quad (3.21)$$

Agafant com a referència els resultats de sensibilitat relativa, es pot observar quins efectes tenen sobre la variable en els canvis efectuats en els paràmetres. Els resultats

### 3. MATERIALS I MÈTODES

---

d'aquesta funció de sensibilitat poden ser positius o negatius. Tot i que la selecció del valor s'efectua en forma de valor absolut, el signe és indicatiu de si la influència sobre la variable té un comportament directament (+) o inversament (-) proporcional respecte a la modificació del paràmetre.

#### 3.5. PLATAFORMA INFORMÀTICA PER ALS ESTUDIS DE SIMULACIÓ. PROGRAMA WEST®

El programa *West*®, (*World Wide Engine for Simulation, Training and Automation*), desenvolupat inicialment per *Most for Water*, és una plataforma informàtica per al modelatge i simulació de diferents processos, com ara plantes de tractament d'aigües residuals, rius, col·lectors i conques fluvials, entre d'altres. Aquest software utilitza models matemàtics capaços de representar una predicció fiable dels sistemes reals.

Els models matemàtics biològics que es poden utilitzar en aquesta plataforma conformen diferents categories. Cada una d'elles considera diferents variables per l'aigua d'entrada i diferents processos que poden tenir lloc en la depuració d'aigües residuals. En funció de la quantitat i precisió de dades que es desitja conèixer (objectius) i de la quantitat d'informació de què disposi la planta, s'escollirà una categoria determinada.

Aquesta plataforma incorpora els models següents:

- ASM1 : Eliminació biològica d' $N_2$  i M.O.
- ASM2: Eliminació biològica de d' $N_2$ , M.O. i P.
- ASM3: Eliminació biològica d' $N_2$  i M.O. Modificació del model ASM1.
- Models de decantació.

ASM1Temp, ASM2Temp i ASM3Temp corresponen a modificacions dels models anteriors amb correcció de temperatura.

L'editor gràfic de la plataforma permet, de manera senzilla, la configuració dels sistemes que es desitgin modelar així com la ubicació dels seus components.

Els models físics que intervenen en els processos de depuració estan representats per nodes. Cada node porta associat una representació gràfica i diferents models matemàtics disponibles per a cadascun d'ells, com es pot observar en la figura 3.8.

### 3. MATERIALS I MÈTODES

---

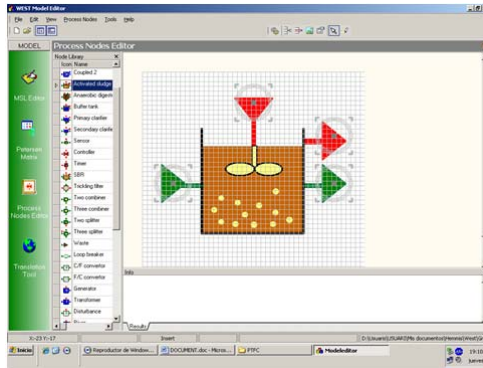


Figura 3.8: Editor gràfic West. Desplegament de la llibreria de nodes.

## RESULTATS I DISCUSSIÓ

---



## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

---

### 4.1. MODELITZACIÓ I CALIBRATGE DE L'EDAR DE LA VALL DEL GES

Aquest capítol s'inicia amb el calibratge del model de planta. Es fa ús del protocol Good Modelling Practices (GMP), presentat en el capítol 3, on es recomana que, una vegada determinats els objectius a assolir, es procedeixi prèviament a l'adquisició de la informació necessària, per tal d'iniciar l'etapa de calibratge. En aquests apartats s'intenta recopilar la màxima informació sobre el funcionament de l'EDAR, les dades de disseny (presentades en el capítol 1, apartat 1.1.3), així com les dades operacionals com ara les característiques de l'influent i de l'efluent, la capacitat d'aeració, les bombes impulsores i de totes les dades que puguin ser necessàries per tal de dur a terme un bon calibratge de la planta.

#### 4.1.1. DEFINICIÓ DEL PROJECTE

Tal com s'ha presentat en el capítol 2 els principals objectius del projecte són l'optimització dels costos energètics de l'EDAR de la Vall del Ges, mantenint les concentracions de nitrogen en l'efluent d'acord amb els límits legals. Aquests objectius han estat definits conjuntament amb l'equip responsable de l'explotació de l'EDAR. El model que s'haurà de construir ha de presentar les mateixes característiques de l'EDAR estudiada, però caldrà un ajustament de les característiques cinètiques i estequiomètriques per tal que el comportament del model sigui el més semblant al funcionament real de la planta. Prenent com a base el model ASM1 (Henze et al. 1987) com a model bioquímic, el model de sedimentació de Takács (Takács et al. 1991) i com a protocol de calibratge el GMP (Rieger et al. 2012), es pretén crear un model per a l'EDAR de la Vall del Ges per tal d'obtenir un bon calibratge. Una vegada calibrada, s'avaluaran diferents estratègies per tal de comprovar quina és capaç d'assolir amb els millors resultats, els objectius marcats inicialment.

#### 4.1.2. ADQUISICIÓ I CONCILIACIÓ DE DADES

En el apartat d'adquisició de dades, el més important és conèixer de quantes dades es disposa i la seva qualitat. De manera continuada segons la distribució presentada a la taula 4.1, la planta efectua analítiques de l'influent i de l'efluent amb les freqüències presentades així com la relació de rendiments obtinguts inclosos a la taula 4.2. També és possible conèixer els valors dels cabals de les recirculacions interna i externa. Les dades que s'han utilitzat en aquest cas corresponen als valors històrics de la planta durant l'any 2009.

Les dades de què disposa l'EDAR corresponen als seguiments analítics efectuats en diferents punts de la planta i amb freqüències planificades. El seguiment dels paràmetres pH, concentració d'OD i potencial redox es realitzen de manera



## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

continuada, mitjançant sensors, mentre que la DQO, DBO i els TSS s'analitzen amb les freqüències incloses a la taula 4.1.

Taula 4.1: Paràmetres analítics i freqüències de mostreig a l' EDAR de la Vall del Ges.

Mètode	Paràmetre	Simbologia	Freqüència	Punt de mostreig
Analític	Totals Sòlids en Suspensió	TSS		
	Demanda Química d'Oxigen	DQO		
	Demanda Biològica d'Oxigen	DBO	2 mostres	
	Amoni	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	setmanals	
	Nitrogen Total Kjeldhal	NTK	1 mostra	Influent , Efluent
	Nitrogen Total	N total	setmanal	
	Fòsfor Total	P total		
	Nitrats	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2 mostres	
	Nitrits	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Setmanals	Efluent
	Sensors	Sedimentació a 30 minuts	V <sub>30</sub>	Diari
Sòlids Volàtils en Suspensió		SSV	1 mostra setmanal	Reactor Biològic, Recirculació
Sòlids en Suspensió en el licor de mescla		MLSS	2 mostres setmanals	
pH		pH		Influent 3 canals reactor biològic
			Continu	
Oxigen Dissolt		OD		3 canals reactor biològic
			Continu	
Potencial Redox	ORP		Influent , 3 canals del reactor biològic	
		Continu		

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.2: Mitjanes mensuals de cabals i rendiments de depuració (any 2009).

Mes	Cabal influent (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	TSS Rendiment (%)	DQO Rendiment (%)	DBO Rendiment (%)	N total Rendiment (%)	P total Rendiment (%)
Gener	5133	96,9	90,8	99,0	77,0	97,8
Febrer	5157	97,8	93,7	99,2	78,1	97,5
Març	4779	98,1	93,6	99,0	80,3	98,1
Abril	5440	98,0	94,6	99,2	83,8	95,3
Maig	4767	97,4	94,6	99,3	80,9	96,3
Juny	4516	95,9	91,5	98,4	79,4	91,8
Juliol	4694	98,2	95,4	99,7	60,9	94,1
Agost	3493	90,0	86,0	97,3	63,3	90,4
Setembre	4417	89,7	87,7	98,3	49,5	97,6
Octubre	3896	98,1	94,2	98,7	25,6	86,0
Novembre	4417	98,6	95,3	99,0	81,8	87,7
Desembre	4369	98,1	93,8	98,5	74,6	91,3

### 4.1.2.1. CARACTERISTIQUES DE L'INFLUENT D'ENTRADA

Les característiques de l'aigua d'entrada a l'EDAR de la Vall del Ges es troben enumerades a la taula 4.3. Els valors que hi figuren corresponen al tractament estadístic de les dades històriques durant l'any 2009.

Taula 4.3: Característiques de l'influent tractat a l'EDAR durant l'any 2009.

Paràmetre	Mitjana	Mínim	Màxim	Desviació estàndard
Cabal d'entrada (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	4548	2246	10187	1179,5
DQO (g O <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup> )	606	74	2548	503,7
DBO <sub>5</sub> (g O <sub>2</sub> ·m <sup>-3</sup> )	229	23	813	174,8
TSS (g TSS·m <sup>-3</sup> )	314	12	991	237,1
TKN (g N·m <sup>-3</sup> )	52,9	15,8	117,7	21
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g N·m <sup>-3</sup> )	33,8	4	89,7	15,2
P total ((g P·m <sup>-3</sup> )	14	3,7	82,9	10,5

Les concentracions de contaminants en l'influent al llarg d'aquest any es veuen representades a les figures 4.1 (DQO, DBO, TSS) i a la 4.2 (TKN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, P total).

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

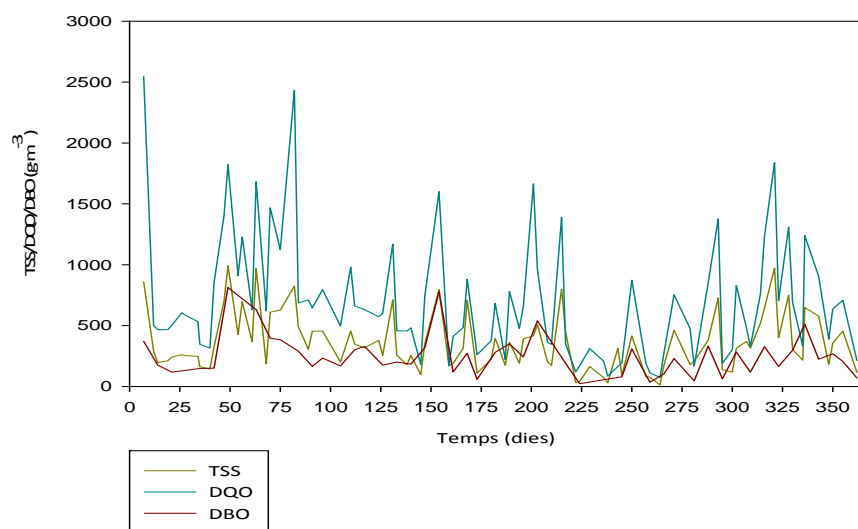


Figura 4.1: Relació de concentració orgànica i de sòlids a l'entrada de l'EDAR durant l'any 2009.

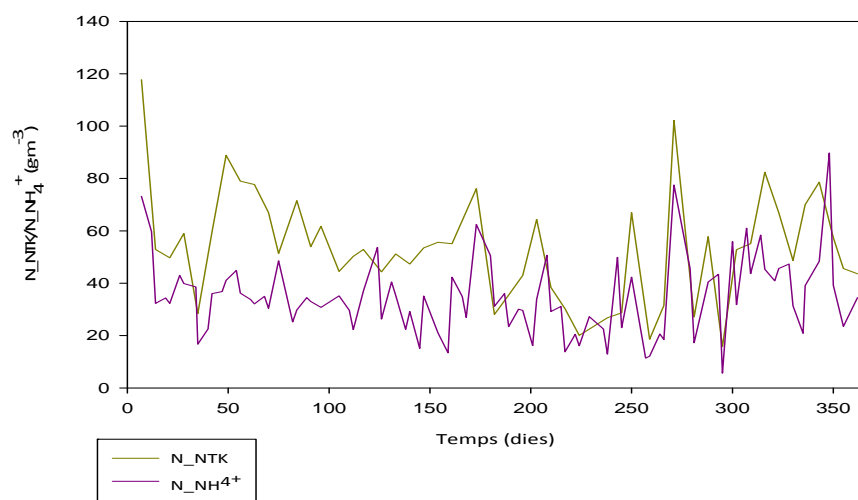


Figura 4.2: Relació de  $N\_NTK$  i  $N\_NH_4^+$  a l'entrada de l'EDAR durant l'any 2009.

(\*) Mostreig NTK (1 mostreig/setmana)

(\*) Mostreig  $NH_4^+$  (2 mostrejos/setmana)

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

### 4.1.2.2. MESURES DE CABAL DE L'INFLUENT

El cabal de l'influent és mesurat mitjançant un cabalímetre del tipus electromagnètic, adequat per a fluids conductius, model MAG3100, de la marca Danfoss. El seu funcionament està basat en la generació d'un voltatge induït i proporcional a la velocitat mitjana del fluid quan passa perpendicular a través d'un camp magnètic, proporcionant, a partir d'un calibratge inicial, la transformació del voltatge detectat en cabal volumètric. El valor de lectura que s'obté d'aquest cabalímetre és un cabal mitjà diari del que passa a través d'aquesta instrumentació al llarg de 24 hores.

Aquesta mesura de cabal inclou a més de l'influent d'entrada, els retorns que provenen de la deshidratació de fangs i del sobrenedant de l'espessidor.

La figura 4.3 mostra la representació de les mitjanes diàries de cabal durant l'any 2009, on s'hi han addicionat els valors pluviomètrics de l'any.

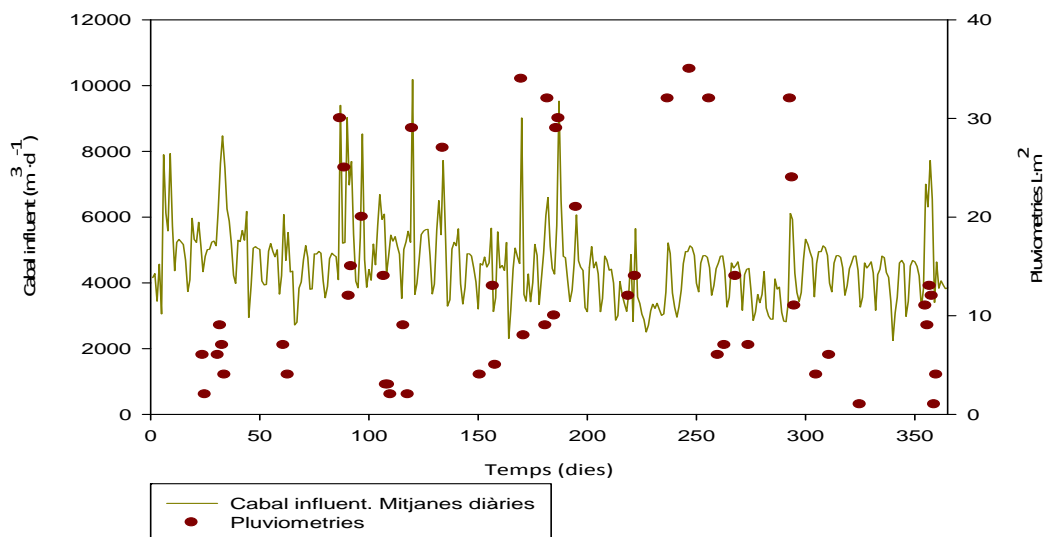


Figura 4.3: Evolució del cabal d'entrada a l'EDAR durant el període estudiat. Any 2009.

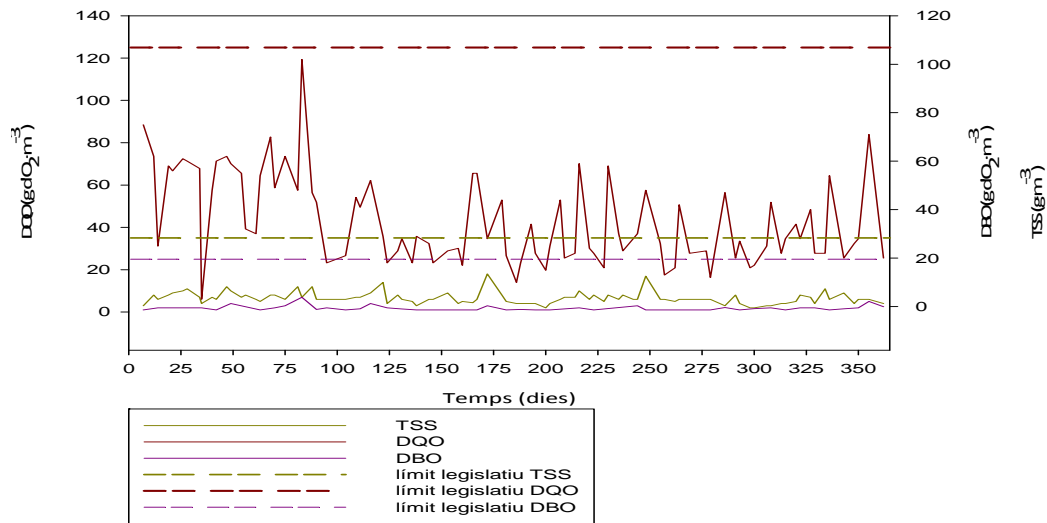
### 4.1.2.3. CARACTERÍSTIQUES DE L'EFLUENT

Tot i la variació de cabals soferta per la planta durant aquest any, es pot observar en els valors de la taula 4.1, que tant els TSS com la DQO i la DBO presenten un bon percentatge d'eliminació (superior al 90% en gairebé tots els casos). Respecte dels nutrients també es pot observar una bona eliminació del fòsfor que, tal com s'ha comentat en el capítol 1, té lloc per precipitació química. Mentre que respecte de l'N total alguns mesos com juliol, agost, setembre i octubre presenten rendiments

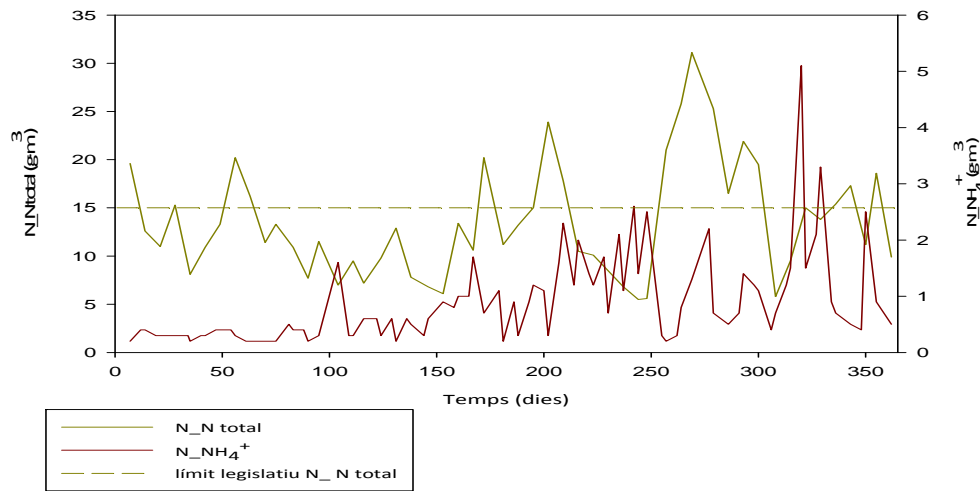
## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

d'eliminació més baixos. En aquests mesos tot i que el cabal tractat és molt inferior al de disseny, es podria aquest descens del rendiment es podria relacionar amb un descens de matèria orgànica durant aquest mateix període.

Les figures 4.4 i 4.5 mostren les concentracions de sortida dels TSS, DQO, DBO i de nutrients (N total i P total) respectivament, que acompanyen a l'efluent.



Tal com es pot observar en la figura 4.4, els bons percentatges d'eliminació de matèria orgànica i de sòlids fan que en cap moment els paràmetres sobrepassin els límits legislatius establerts durant el període estudiat.



## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

---

Encara que puntualment alguna mostra sobrepassi el valor de  $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , això no vol dir necessàriament que s'incompleixi el límit legislatiu ja que aquest fa referència a mostres integrades durant 24 hores. Per tant no es pot concloure en cap cas, amb aquestes dades, que s'hagin produït incompliments en la qualitat de sortida de la planta .

### 4.1.2.4. CONTROL D'OPERACIÓ DE LA PLANTA

El control d'operació de l'EDAR de la Vall del Ges es realitza, en part, mitjançant la temporització de les bombes i, en part, de forma manual.

#### RECIRCULACIONS I PURGA

- Recirculació interna (nitrats): aquest cabal és regulat mitjançant el funcionament de tres bombes de  $330 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  cadascuna, que treballen de manera manual les 24 hores dia. En total s'aporta un cabal de  $23760 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  des del canal intern fins al canal extern del reactor biològic.
- Recirculació externa (fangs actius): efectuada per una bomba de  $200 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  que treballa també a mode manual i aproximadament les 24 hores dia. El cabal d'aquesta recirculació és actualment de  $4320 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  transferits des dels sedimentadors al canal extern del reactor biològic.
- Purga de fangs: S'extreuen del sistema aproximadament uns  $200 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$  mitjançant una bomba que es posa en funcionament manualment quan és necessària l'evacuació de fangs cap a l'espessidor per gravetat i posteriorment al tractament de deshidratació, és un cabal aproximatiu que caldria confirmar.

### 4.1.2.5. CAPACITAT D'AERACIÓ

L'aeració s'efectua mitjançant 14 rotors distribuïts en els diferents canals de l'Orbal, (veure figura 4.6). Els motors que mouen els rotors poden treballar a dues velocitats, lenta (43 rpm) i ràpida (57 rpm). En la zona aeròbia, cada motor mou un parell de rotors situats contiguament (H,I), (J,K), (D,E) i (B,C), per tal d'assolir les concentracions d'OD necessàries per a la nitrificació i l'eliminació de matèria orgànica. En aquest cas es disposa doncs de quatre motors i vuit possibilitats de treball.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

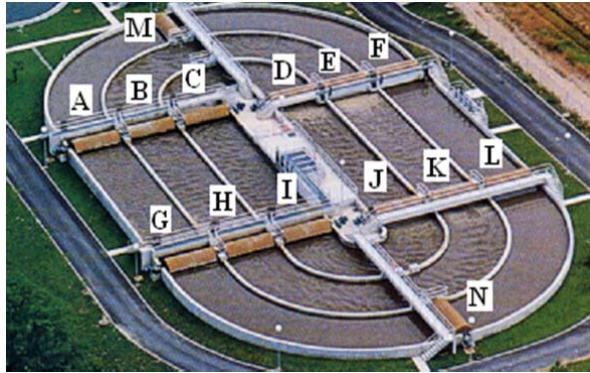


Figura 4.6: Distribució dels rotors en el reactor biològic.

En la zona anòxica els rotors (M, A, G, N, L, F) només es posen en marxa de manera simultània cada 6 hores i durant 15 minuts, per vehicular l'aigua i evitar sedimentacions en el canal extern (zona anòxica).

Pels canals aerobis (intermedi i intern) la planta treballa actualment amb un control manual en llaç obert utilitzant algunes consignes com ara la concentració d'OD en els canals en funció de la concentració d'amoni i nitrats en l'efluent. En aquests canals sempre hi ha dos rotors treballant a velocitat ràpida.

A través de la sonda d'oxigen i de les consignes del reactor biològic s'han establert cinc modalitats de funcionament:

- 2 rotors funcionant a velocitat ràpida + 1 a velocitat lenta.
- 3 rotors funcionant a velocitat ràpida.
- 3 rotors funcionant a velocitat ràpida + 1 a velocitat lenta.
- 4 rotors funcionant a velocitat ràpida.
- 2 rotors funcionant a velocitat ràpida.

La capacitat d'aeració ve donada per la velocitat del motor, el nombre de discos que conforma cada rotor així com el seu nivell d'immersió.

- Canal extern: 6 rotors amb 19 discs/rotor = 114 discs  
Velocitat ràpida:  $114 \times 1,12 \times 0,86 = 109,8$  (kg O<sub>2</sub> canal·h<sup>-1</sup>)  
Velocitat lenta:  $114 \times 0,66 \times 0,86 = 64,8$  (kg O<sub>2</sub> canal·h<sup>-1</sup>)
- Canal intermedi: 4 rotors amb 30 discs/rotor = 120 discs  
Velocitat ràpida:  $120 \times 1,12 \times 0,81 = 108,87$  (kg O<sub>2</sub> canal·h<sup>-1</sup>)

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Velocitat lenta :  $120 \times 0,66 \times 0,81 = 64,15$  (kg O<sub>2</sub> canal·h<sup>-1</sup>)

- **Cabal intern:** 4 rotors amb 27 discs/rotor = 108 discs

Velocitat ràpida:  $108 \times 1,12 \times 0,62 = 75,0$  (kg O<sub>2</sub> canal·h<sup>-1</sup>)

Velocitat lenta:  $108 \times 0,66 \times 0,62 = 44,2$  (kg O<sub>2</sub> canal·h<sup>-1</sup>)

La capacitat d'aeració per a cada disc així com els factors de correcció per a cada canal són dades facilitades per la casa subministradora per una profunditat d'immersió dels rotors de 53,3 cm. La relació d'aportació d'oxigen per a F/S (*Fast/Slow*) és d'1,59.

### 4.1.2.6. COSTOS ENERGÈTICS ASSOCIATS AL FUNCIONAMENT DE L'EDAR

L'EDAR de la Vall del Ges té una potència contractada de 250 kW, amb una modalitat de tarifa d'accés de 3.1-A (alta tensió). Els períodes tarifaris aplicats actualment a la planta són els corresponents a l'article 8 del R.D. 1164/2001, i la modalitat d'hores punta, pla i vall venen determinades segons l'ordre ITC/3801/2008 de 26 de desembre. La despesa total energètica que aquesta planta va presentar durant l'any 2009 derivada de la facturació fixa (potència contractada) més part variable (segons consum energètic) s'il·lustra a la figura 4.7.

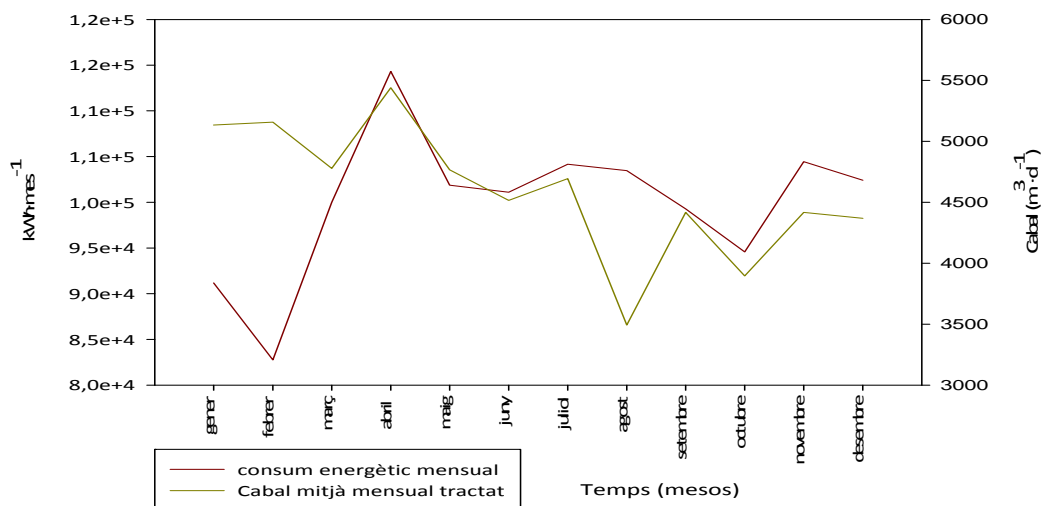


Figura 4.7: Consum energètic total i cabal tractat a l'EDAR durant l'any 2009.



## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

---

El consum energètic màxim correspon als mesos de primavera, disminuint lleugerament a l'estiu per tornar a incrementar durant el període d'hivern. Aquest gràfic mostra coincidència entre el consum energètic i la mitjana mensual de cabals tractats, a excepció dels mesos de gener, febrer, juliol i agost. En aquests darrers mesos tot i que la mitjana de cabals tractats disminueix i el període tarifari aplicat és de la qualificació P-6, (temporada baixa i facturació les 24 h del dia com a hores vall), la despesa energètica és superior. Això podria ser degut a la necessitat d'aportació de més quantitat d'oxigen (per la seva baixa solubilitat) en augmentar la temperatura de l'aigua, la qual cosa coincidiria amb la baixada de consum dels mesos de gener i febrer que, tot i tractar cabals més grans, presenten els consums anuals més baixos, amb períodes tarifaris més estrictes.

El consum energètic presentat anteriorment és degut principalment al consum de les bombes i dels motors que accionen els rotors. En aquesta EDAR, el sistema de bombament està integrat per 28 bombes de les quals 5 són dosificadores i 21 d'impulsió, amb la distribució següent:

Dosificadores:

- 2 dosificadores de clorur de ferro (III).
- 3 dosificadores de polielectròlit.

D'impulsió:

- 3 en el pou de bombament a l'entrada de l'EDAR.
- 4 en el reactor biològic.
- 2 en el pou de bombament del sedimentador secundari.
- 3 per a la recirculació externa.
- 3 per a la purga de fangs.
- 5 de conducció d'una part de l'aigua tractada, cap a la zona de deshidratació de fangs ( 3 per a la preparació del polielectròlit i 2 per a la neteja dels filtres).
- 3 en l'espessidor (conducció de fangs espessits a tractament).

La distribució d'aquestes bombes es troba incorporada a la figura 4.8.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

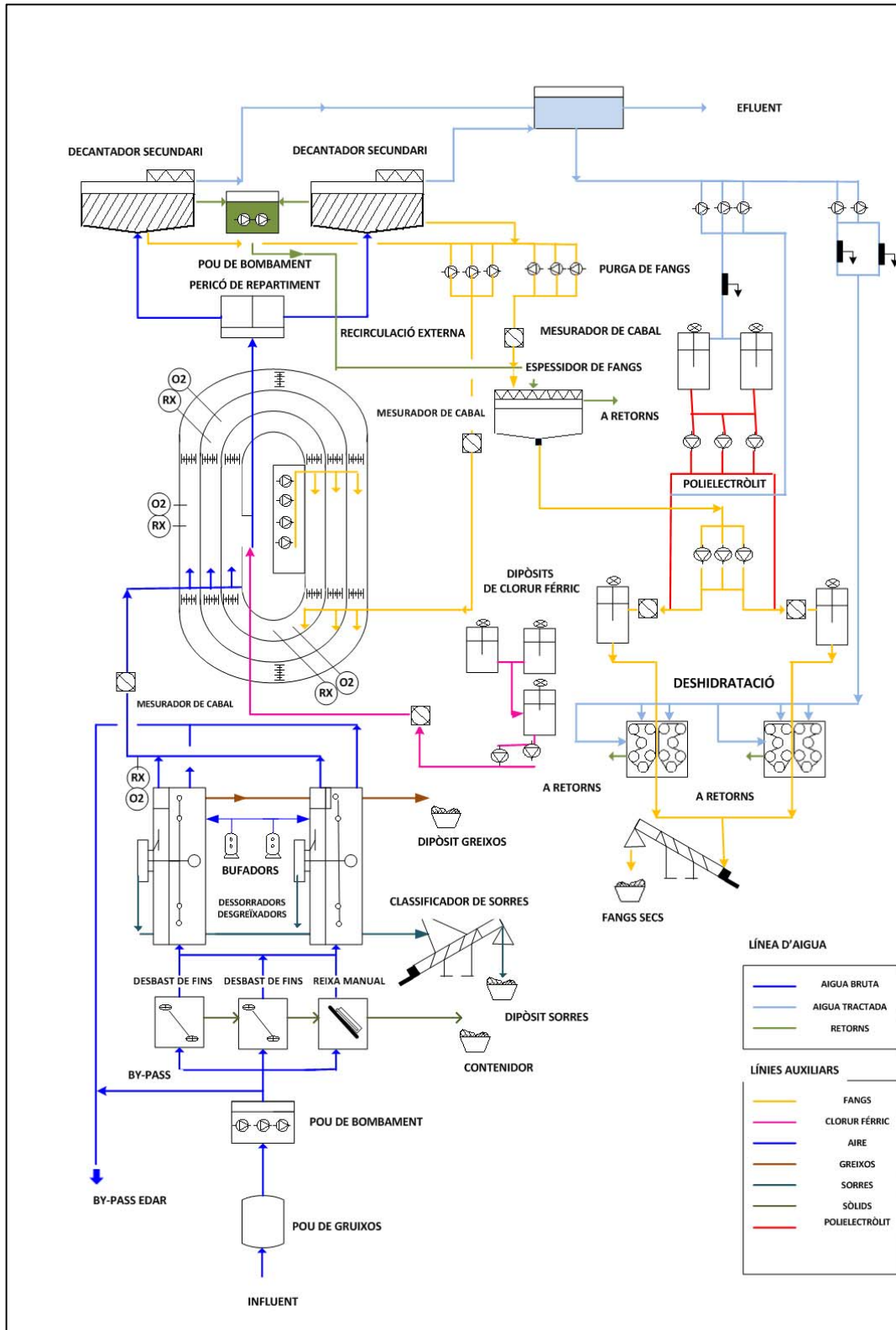


Figura 4.8: EDAR de la Vall del Ges. Distribució dels sistemes de bombament.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Ara bé, no tot el consum energètic és degut al sistema de bombament sinó que una gran part d'aquest consum és atribuïble als motors que accionen els 7 parells de rotors. Com que cada motor mou un parell de rotors, la planta disposa d'un total de 7 motors. La distribució del consum energètic, calculada a partir de les corresponents hores de funcionament de bombes i rotors, així com les dades de consums elèctrics relacionats amb el cabal d'aigua tractada es van presentar prèviament en el capítol 1.

Després d'analitzar les dades de funcionament i de distribució de la despesa energètica, es considera que el control de l'aeració de la planta i la millora de la desnitrificació són els llaços de control més importants a considerar.

### 4.1.2.7. CONCILIACIÓ DE DADES

L'objectiu de la conciliació de dades és la verificació de les dades operacionals de la planta (cabals d'entrada, sortida, recirculacions i purga de fangs), mitjançant balanços màssics a fi de detectar possibles errors. Aquests balanços s'han basat en els valors dels cabals mesurats en la planta i de la concentració de sòlids totals en els fluxos d'entrada i de sortida, per tal d'assegurar els valors dels fluxos no mesurables, i per tant, més incerts, com ara el cabal de purga. Per altra banda, els valors històrics que facilita la planta són els corresponents a mostres efectuats a l'entrada del pre-tractament i que seran utilitzats com a entrada al biològic, la qual cosa requereix la seva. Per tal d'efectuar aquesta comprovació s'han recollit mostres integrades durant 7 dies a l'entrada del reactor biològic, s'han analitzat els paràmetres més significatius i s'ha fet un seguiment del cabal d'entrada a la planta durant el període del 8 al 15 de juny de 2009.

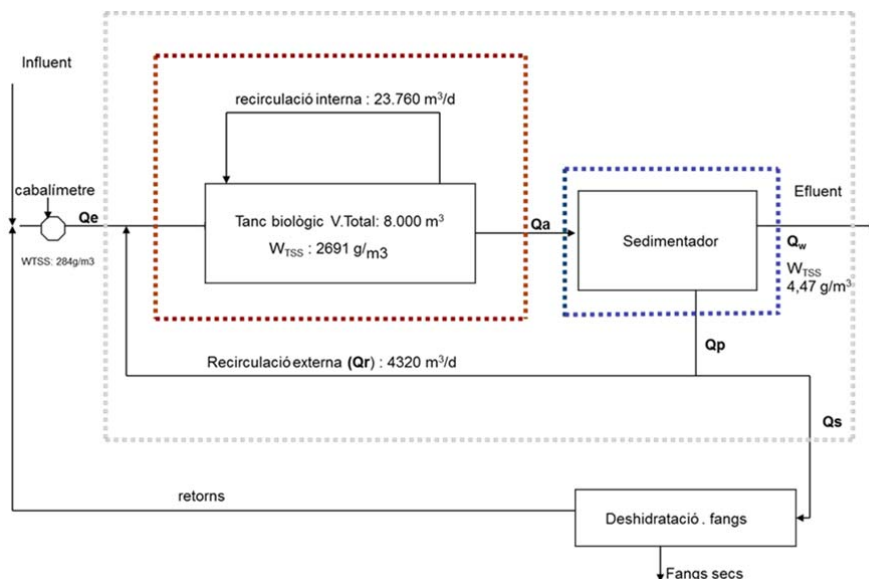


Figura 4.9: Diagrama de blocs de l'EDAR per al càlcul de balanços.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

A continuació, s'especifiquen els càlculs adients per tal de calcular el cabal de purga i el TRC.

- COMPROVACIÓ DEL CABAL DE PURGA

Valors de cabals de partida:

- Cabal entrada (influent + retorns) :  $4257 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  (cabal mitjà dels 7 dies) .
- Cabal recirculació interna :  $23760 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  (segons hores funcionament bombes).
- Cabal de la recirculació externa:  $4320 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  (segons hores funcionament bombes).
- Cabal purga: és el menys fiable. Es realitza de forma manual i és el que serà ajustat per balanç.
- Cabal de l'efluent a calcular pel balanç.

La relació de dades utilitzades i el seu origen es mostren a la taula 4.4.

Taula 4.4: Paràmetres utilitzats per al càlcul del cabal de purga de fangs.

DADES CAMPANYA	DADES (ANALÍTIQUES LAB)
TSS entrada: $284 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$	TSS sortida: $4,47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$
	TSS tanc biològic: $2691 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$
Cabal entrada (influent + retorns)	P total sortida: $0,93 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$

### **BALANÇ TSS**

\*Després de provar diferents valors per Qs de 200 i  $210 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  i comprovar que el balanç de sòlids no es compleix li suposem finalment un valor de  $220 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$

Base de càlcul: 1 dia

**1.-** Balanç global de cabals en el sistema reactor-tanc biològic:

$$Q_e = Q_s + Q_w$$

$$4257 = 220 + Q_w$$

$$Q_w = 4037 \text{ m}^3$$

**2.-** Balanç de cabals en el tanc biològic:

$$Q_a = Q_e + Q_r$$

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

---

$$Q_a = 4257 + 4320 = 8577 \text{ m}^3$$

3.- Balanç de cabals en el sedimentador:

$$Q_a = Q_w + Q_p$$
$$8577 = 4037 + Q_p$$

$$Q_p = 4540 \text{ m}^3$$

dels quals 4320 m<sup>3</sup> van a recirculació de fangs i 220 m<sup>3</sup> van a purga.

4.- Balanç de sòlids en el sedimentador:

$$Q_a \cdot W_{tss} = Q_w \cdot W_{tss} + Q_p \cdot W_{tss}$$

$$8.577 \text{ m}^3 \cdot 2691 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} = 4037 \text{ m}^3 \cdot 4,47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} + 4540 \text{ m}^3 \cdot W_{tss}$$

$$W_{tss} \text{ a } Q_p = 5080 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} = W_{tss} \text{ a } Q_s \text{ i } W_{tss} \text{ a } Q_r$$

5.- Balanç de sòlids per a tot el sistema i comprovació de cabals:

$$Q_e \cdot W_{tss} = Q_s \cdot W_{tss} + Q_w \cdot W_{ss}$$

$$4257 \text{ m}^3 \cdot 284 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} = 220 \text{ m}^3 \cdot 5080 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} + 4037 \text{ m}^3 \cdot 4,47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$1282,14 \text{ Kg} \neq 1113,46 \text{ Kg}$$

Per tant hi ha una diferència de 73 kg·d<sup>-1</sup>, es podria donar per bona l'estimació del cabal de purga en 220 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>. Tot i això, es torna a calcular el balanç per reajustar més aquest cabal, partint d'un valor de 230 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>.

**BALANÇ TSS** (en el qual els precipitats de fosfat fèrric s'hi troben inclosos)

Base de càlcul: 1 dia

1.- Balanç global de cabals en el sistema reactor-tanc biològic:

$$Q_e = Q_s + Q_w$$

$$4257 = 230 + Q_w$$

$$Q_w = 4027 \text{ m}^3$$

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

2.- Balanç de cabals en el tanc biològic:

$$Q_a = Q_e + Q_r$$

$$Q_a = 4257 + 4320 = 8577 \text{ m}^3$$

3.- Balanç de cabals en el sedimentador:

$$Q_a = Q_w + Q_p$$

$$8577 = 4027 + Q_p$$

$$Q_p = 4550 \text{ m}^3$$

dels quals 4320 m<sup>3</sup> van a recirculació de fangs i 230 m<sup>3</sup> a purga.

4.- Balanç de sòlids en el sedimentador:

$$Q_a \cdot W_{tss} = Q_w \cdot W_{tss} + Q_p \cdot W_{tss}$$

$$8577 \text{ m}^3 \cdot 2691 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} = 4027 \text{ m}^3 \cdot 4,47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} + 4550 \text{ m}^3 \cdot W_{tss}$$

$$W_{tss} \text{ a } Q_p = 5068,7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} = W_{tss} \text{ de } Q_s \text{ i } W_{tss} \text{ de } Q_r$$

5.- Balanç de sòlids per a tot el sistema i comprovació de cabals

$$Q_e \cdot W_{tss} = Q_s \cdot W_{tss} + Q_w \cdot W_{ss}$$

$$4257 \text{ m}^3 \cdot 284 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} = 230 \text{ m}^3 \cdot 5068,7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3} + 4027 \text{ m}^3 \cdot 4,47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$$

1208,99 Kg  $\approx$  1183,80 kg, la qual cosa implica una diferència de 25 kg. En conseqüència es considera el cabal de **230 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>**

El valor en que es contrasta el TRC calculat, és amb el valor en que treballa la planta,

- COMPROVACIÓ DEL TRC

Per a la seva comprovació s'han utilitzat els valors extrets dels històrics de la planta i corresponents al període de mostreig.

Taula 4.5: Relació de paràmetres per a la comprovació del TRC.

MLVSS BIOLÒGIC (g·m <sup>-3</sup> )	MVSS A REC/PURGA (g·m <sup>-3</sup> )
1810,10	2347,48
1529,70	2230,57
691,42	1170,96
664,00	2326,66
Mitjana : 1173,8	Mitjana: 2018,92

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Paràmetres del biològic i de la recirculació de fangs Juny 2009.

- Mitjanes de MVSS dins del reactor biològic i en la purga de fangs.
- Volum de reactor : 8.000 m<sup>3</sup>.
- Cabal purga de fangs: 230 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>.
- Es considera negligible la concentració de MVSS en el efluent tractat.

$$TRC(d) = \frac{MLVSS_{reactor\ biològic}(g \cdot m^{-3}) \cdot V_{reactor}(m^3)}{Q_{purga}(m^3 \cdot d^{-1}) \cdot MLVSS(g \cdot m^{-3})}$$

$$TRC(d) = \frac{1173,8 \cdot 8.000}{230 \cdot 2.018,91} = 20,22 \text{ dies}$$

TRC = calculat a planta per als valors d'aquest període: 20,22 dies.

Càlcul del TRC aplicant dades del balanç i per el període de la campanya de mostreig.

- Mitjanes de MVSS dins del reactor biològic i en la purga de fangs.
- Volum reactor: 8000 m<sup>3</sup>.
- Cabal purga de fangs 230 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup> calculats per balanç.
- Mitjanes de MVSS en la recirculació/purga de fangs segons balanç.

Taula 4.6: Paràmetres utilitzats per a la comprovació del TRC

PARÀMETRES	VALORS
MVSS tanc biològic (g·m <sup>-3</sup> )	Mitjana setmana mostreig (8-15 juny) 2013,04
TSS a la purga (g·m <sup>-3</sup> )	Calculats per balanç 3580

$$TRC(d) = \frac{2.013,04 \cdot 8000}{230 \cdot 3.580} = 19,56 \text{ dies}$$

El càlcul del TRC presenta una diferència de **0,66 dies** respecte del calculat per la planta, per la qual cosa es podria considerar que els valors aplicats en el balanç serien molt aproximats als valors reals de la planta.

### 4.1.3. CONFIGURACIÓ DEL MODEL

La construcció del model de planta s'ha establert en tres etapes que impliquen la selecció:

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

a) del model hidràulic, b) del model biològic i c) del model de sedimentació. El model biològic escollit ha estat l'ASM1 i com a model de decantació el de Takács presentats en els apartats 3.2.2. i 3.2.1. del capítol 3.

### 4.1.3.1. CONSTRUCCIÓ DEL MODEL DE PLANTA

En aquesta etapa, que correspon a la definició del model hidràulic, s'ha utilitzat el model estudiat anteriorment per Anfruns (2006), que va realitzar un treball de camp utilitzant traçadors sobre la caracterització del flux hidrodinàmic que presenta el reactor Orbal de La Vall del Ges. En base a les conclusions d'aquest estudi, s'utilitza la distribució següent per al sistema biològic, tal com mostra la figura 4.10: tres reactors anòxics (ASU-1, ASU-2 i ASU-3, amb un volum 1143 m<sup>3</sup> cadascun) i dos reactors aerobis (ASU-4, de 2667 m<sup>3</sup> i ASU-5, de 1903 m<sup>3</sup>).

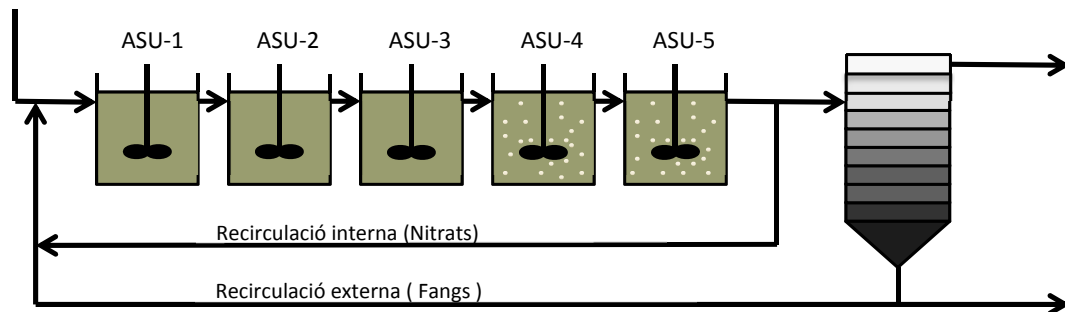


Figura 4.10: Configuració de la planta de la Vall del Ges. Benchmark modificada.52

### 4.1.4. CALIBRATGE I VALIDACIÓ

Una vegada definit el model de planta, l'etapa següent del protocol GMP, és la del calibratge i validació que està considerada com una de les parts més importants en els estudis de simulació de les EDAR. Segons Gernaey et al. (2004), el calibratge dels paràmetres del model, juntament amb la definició dels objectius, la selecció del model i la recopilació de dades són les etapes més importants en aquest tipus d'estudis, de manera que com més ben calibrat es troba el model de planta, més fiabilitat presentaran els resultats obtinguts en les simulacions destinades a la millora del seu funcionament, a l'eliminació de nutrients i l'estalvi energètic, entre d'altres. Cal partir doncs d'un model calibrat, per tal de valorar les possibles estratègies de control a implementar a l'EDAR.

#### 4.1.4.1. CÀLCUL DE L'INFLUENT ESTACIONARI

El fraccionament corresponent a l'estat estacionari ha estat calculat a partir de la mitjana anual dels diferents paràmetres. S'han utilitzat les mitjanes dels valors històrics corresponents a l'any 2009 inclosos a la taula 4.3. Per a l'obtenció de les



## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

diferents fraccions s'han aplicat les equacions de càlcul presentades a la taula 3.4. del capítol 3. La taula 4.7 mostra els valors de les diferents fraccions obtingudes.

Taula 4.7: Valors del fraccionament per a l'estat estacionari.

$S_I$	$S_S$	$X_I$	$X_S$	$X_{BH}$	$X_{BA}$	$X_P$	$S_O$	$S_{NO}$	$S_{NH}$	$S_{ND}$	$X_{ND}$	$S_{ALK}$	TSS	$T^a$ °C
35,5	363	246,1	60,2	0,0	0,0	0,0	0,0	9,5	34,9	10,6	8,2	30,0	361,6	17,5

En  $g \cdot m^{-3}$

\* Cabal mitjà d'entrada:  $4584 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ .

### 4.1.4.2. GENERACIÓ DE L'INFLUENT DINÀMIC

Per a la generació de l'influent dinàmic s'han utilitzat dues opcions:

- Un influent anomenat real en el que les diferents fraccions han estat calculades a partir dels valors mitjans de la planta i que ha estat utilitzat en el calibratge de l'EDAR.
- Un influent Benchmark que serà utilitzat en les simulacions corresponents per tal d'avaluar les estratègies de control a temps real. Aquest ha estat generat a partir d'un model genèric incorporat a la plataforma ASM1 d'influents contaminats i proposat per Gernaey (2011) que incorpora diferents apartats: aigües residuals urbanes, aportació industrial, factor de correcció estacional i un model de sòl per detectar infiltracions en períodes de pluja. Per al fraccionament d'aquest influent s'utilitzen les mateixes fraccions solubles i insolubles de matèria orgànica i nitrogen que el model ASM1. Per tal d'adaptar al màxim la generació de l'influent a la realitat de l'EDAR es va escalar l'influent de la plataforma BSM-LT de tal manera que les mitjanes i les desviacions típiques estàndards anuals coincidissin amb les mitjanes i desviacions estàndard anuals de la planta corresponents a l'any 2009. En general, la utilització d'un influent dinàmic permet una millor avaluació de les estratègies de control a llarg termini (Rossen, 2004).

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

---

### 4.1.4.3. CALIBRATGE DEL MODEL BIOLÒGIC

La caracterització dels components de les aigües residuals permet l'ajustament amb el calibratge del model a escala real. El primer pas és el calibratge en estat estacionari. En general, en el calibratge en estat estacionari es determinen els paràmetres responsables del comportament a llarg termini de la planta, i.e.  $Y_H$ ,  $f_p$ ,  $b_H$  i  $X_I$  en l'influent. Aquets paràmetres es troben correlacionats, ja que si algun valor és modificat, s'haurà de compensar amb la modificació d'algun altre paràmetre. L'assoliment del calibratge en estat estacionari resulta molt útil per tal d'establir les condicions inicials de les variables d'estat en el model previ al calibratge en dinàmic. Si l'objectiu és avaluar el comportament del sistema dinàmic, es fa necessari disposar de les dades dinàmiques d'entrada a planta, ja que aquestes contenen més informació que les utilitzades per l'estat estacionari. Un aspecte important a considerar en el comportament dinàmic és l'obtenció d'informació fiable sobre els paràmetres capaços de predir situacions dinàmiques, com ara el grau màxim de creixement de la biomassa.

#### 4.1.4.3.1. PROTOCOL DE CALIBRATGE

El protocol de calibratge utilitzat és el mostrat a la figura 4.11 i ha estat adaptat del protocol proposat per Corominas (2006). En la simulació en estat estacionari, es calibren els TSS del reactor biològic així com l'OD de les zones aeròbiques i en la simulació en estat dinàmic s'ajusten els paràmetres relacionats amb els compostos nitrogenats, bàsicament  $NH_4^+$  i  $NO_3^-$ . Qualsevol variació en les constants cinètiques, estequiomètriques o els valors del coeficient global de transferència d'oxigen ( $K_L a$ ), utilitzats per ajustar la simulació en estat dinàmic, requereix d'un nou calibratge de l'estat estacionari, a fi de comprovar el manteniment de la biomassa i de l'OD. Aquest protocol, desenvolupat en el treball de Corominas (2006), ha estat adaptat substituint els seguiments d'evolució diària durant 30 dies, corresponent a la simulació a curt termini, per l'estat estacionari (100 dies). D'altra banda, el seguiment per a 100 dies ha estat substituït per la simulació a 365 dies (dinàmic), a fi de determinar el comportament de la planta a llarg termini. Els paràmetres proposats per aquest autor a fi d'aconseguir un bon calibratge, seran seleccionats en funció dels resultats obtinguts en l'anàlisi de sensibilitat local, per tal de veure la influència que presenten cadascun d'ells sobre el valor de la variable a calibrar.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

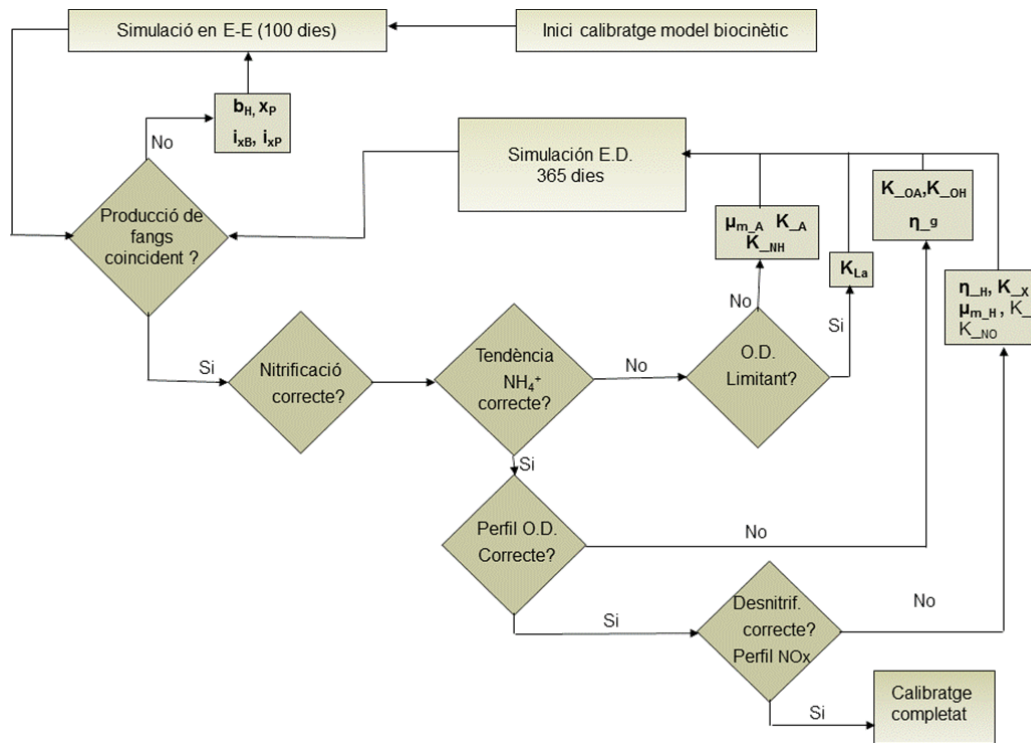


Figura 4.11: Esquema del protocol de calibratge del model biològic.

Com es pot comprovar en el protocol presentat, per tal d'aconseguir la modificació d'una variable, existeix la possibilitat de variar el valor de més d'un paràmetre. Per tal d'establir quin dels paràmetres actuarà amb més eficàcia sobre el canvi de la variable, s'efectua prèviament una anàlisi de sensibilitat.

### 4.1.4.3.2. ANÀLISI DE SENSIBILITAT

Per tal de d'avaluar l'impacte que petits canvis dels valors de les constants presentades en el protocol de calibratge tenen sobre les variables de sortida del model, s'ha realitzat una anàlisi de sensibilitat local per tal de comprovar el seu comportament quan aquests paràmetres són modificats respecte dels seus valors de referència. Tal com s'ha comentat anteriorment, aquest apartat pretén seleccionar quins dels paràmetres recomanats pel protocol resulta més eficaç a l'hora d'actuar sobre el canvi dels valors de les variables i assolir un bon ajustament del calibratge.

La relació de paràmetres als quals s'ha aplicat una anàlisi de sensibilitat es troben inclosos a la taula 4.8, juntament amb els seus valors per defecte i els valors de modificació utilitzats per diferents experts en calibratge i recopilats per Hauduc (2011).

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

El factor de perturbació que s'ha aplicat és d' $1 \cdot 10^{-6}$  ja que s'ha de treballar amb factors suficientment petits com per que la variable canviï de forma lineal respecte a les variacions del paràmetre (mètode de diferències finites en models no lineals) i amb un factor de control de 2. Les simulacions de l'anàlisi de sensibilitat s'han iniciat després d'una simulació en estat dinàmic de 100 dies per tal de treballar sobre el sistema estabilitzat. L'influent per a l'anàlisi de sensibilitat és el mateix influent estacionari de la planta. S'ha aplicat el valor per defecte a tots els paràmetres.

El programa d'anàlisi de sensibilitat s'ha realitzat utilitzant la plataforma informàtica West® que dona simultàniament tres gràfiques corresponents a:

- 1) Una simulació, que presenta els resultats obtinguts (referència i perturbació) i que fa esment a l'exactitud de l'anàlisi de sensibilitat.
- 2) La funció de sensibilitat absoluta que conté els valors de sensibilitat absoluta (perturbació i control).
- 3) La funció de sensibilitat relativa que conté els valors de sensibilitat relativa (perturbació i control).

Quan la sensibilitat de la simulació de referència no difereix gaire de la sensibilitat de la simulació de perturbació, es pot considerar que l'anàlisi de sensibilitat és correcte. Es considera que el factor de perturbació seleccionat és el més adequat perquè es correspon amb les condicions òptimes d'una suma d'errors mínima, tal com va ser demostrat per Pauw (2005). Aquest autor va relacionar els valors de totes les funcions de sensibilitat sota diferents criteris estadístics amb els valors òptims del factor de perturbació.

CRITERI	VALORS PER A TOTES LES FUNCIONS DE SENSIBILITAT	VALORS PER ÒPTIMS FACTORS DE PERTORBACIÓ
Error relatiu màxim	$3,41 \cdot 10^{-7}$ - $7,2 \cdot 10^{+3}$	$3,41 \cdot 10^{-7}$ - $1,94 \cdot 10^{+1}$
Suma d'errors quadràtics	$1,93 \cdot 10^{-16}$ - $1,72 \cdot 10^{+11}$	$1,93 \cdot 10^{-16}$ - $7,96 \cdot 10^{+2}$
Suma d'errors absoluts	$8,19 \cdot 10^{-9}$ - $2,21 \cdot 10^{+5}$	$8,19 \cdot 10^{-9}$ - $2,02 \cdot 10^{+1}$

En els corresponents anàlisis de sensibilitat s'inclouen els resultats obtinguts per aquests criteris estadístics.

La taula 4.8 inclou la relació de paràmetres i variables estudiades.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.8: Relació de paràmetres i variables de l'anàlisi de sensibilitat.

VARIABLE	PARÀMETRES	VALOR PER DEFECTE	VALORS RECOMANATS (HAUDUC)
<b>TSS en reactor biològic</b>	$b_H$ (taxa de decaïment heterotròfic)	0,62 d <sup>-1</sup>	0,4/0,41/0,5/0,53
	$I_{xb}$ (fracció d'N a biomassa)	0,086 (g d'N en $X_{BA}$ - $X_{BH}$ ) * g DQO <sup>-1</sup>	0,08
	$I_{xp}$ (fracció d'N a productes particulats)	0,06 (g d'N en $X_p$ )*g DQO <sup>-1</sup>	-
<b>OD en reactor biològic</b>	$K_{OA}$ (ct de saturació oxigen autotròfic)	0,40 g d'O <sub>2</sub> *m <sup>-3</sup>	0,2/0,5/0,75
	$K_{OH}$ (ct de saturació oxigen heterotròfic)	0,20 g d'O <sub>2</sub> *m <sup>-3</sup>	0,05/0,1
	$\eta_g$ (factor de correcció creixement anòxic)	0,80 (adimensional)	0,6
	$K_{La}$ Coeficient global de transferència d'oxigen	2 h <sup>-1</sup>	-
<b>Nitrific. (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) efluent</b>	$\mu_{mA}$ (màxima taxa creixement autotròfic)	0,80 d <sup>-1</sup>	0,77/0,82/0,85/0,90
	$K_A$ (velocitat d'amonificació)	0,08 m <sup>3</sup> *(g DQO· d) <sup>-1</sup>	0,05/0,16
	$K_{NH}$ (ct. de saturació creixement autotròfic)	1 g d'N-NH <sub>3</sub> *m <sup>-3</sup>	0,1/0,5
<b>Desnitrif. NO<sub>3</sub><sup>-</sup> efluent</b>	$\eta_h$ (fact. correc. hidròl. anòxica)	0,4 (adimensional)	0,5/0,6/0,75
	$K_x$ (ct. de saturació hidròlisi)	0,03 g d'X <sub>s</sub> *(g COD. d) <sup>-1</sup>	0,02/0,17/0,15
	$\mu_{mH}$ (màxim creixement heteròtrofs)	6 d <sup>-1</sup>	4/5,7
	$K_s$ (ct. saturació creixement heterotròfic)	20 g DQO* m <sup>-3</sup>	5/10
	$K_{NO}$ (ct. saturació nitrats)	0,5 g d'N-NO <sub>3</sub> m <sup>-3</sup>	0,1/0,2

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

- ANÀLISI DE SENSIBILITAT PER A LES FUNCIONS TSS/ ( $b_{-H}$ ,  $I_{-XP}$ ,  $I_{-XB}$ )

Com que en el calibratge en estat estacionari el que s'intenta regular són els TSS dels reactors biològics, tal com indica el protocol utilitzat, es creen les funcions de sensibilitat pertinents, per tal de comprovar quins dels paràmetres presentats a la taula anterior són els que resulten més sensibles al canvi d'aquesta variable. La figura 4.12 mostra el gràfic de referència/pertorbació resultant. La resta de gràfics així com els de sensibilitat relativa utilitzats per quantificar el pes dels diferents paràmetres han estat incloses a l'apèndix I del treball.

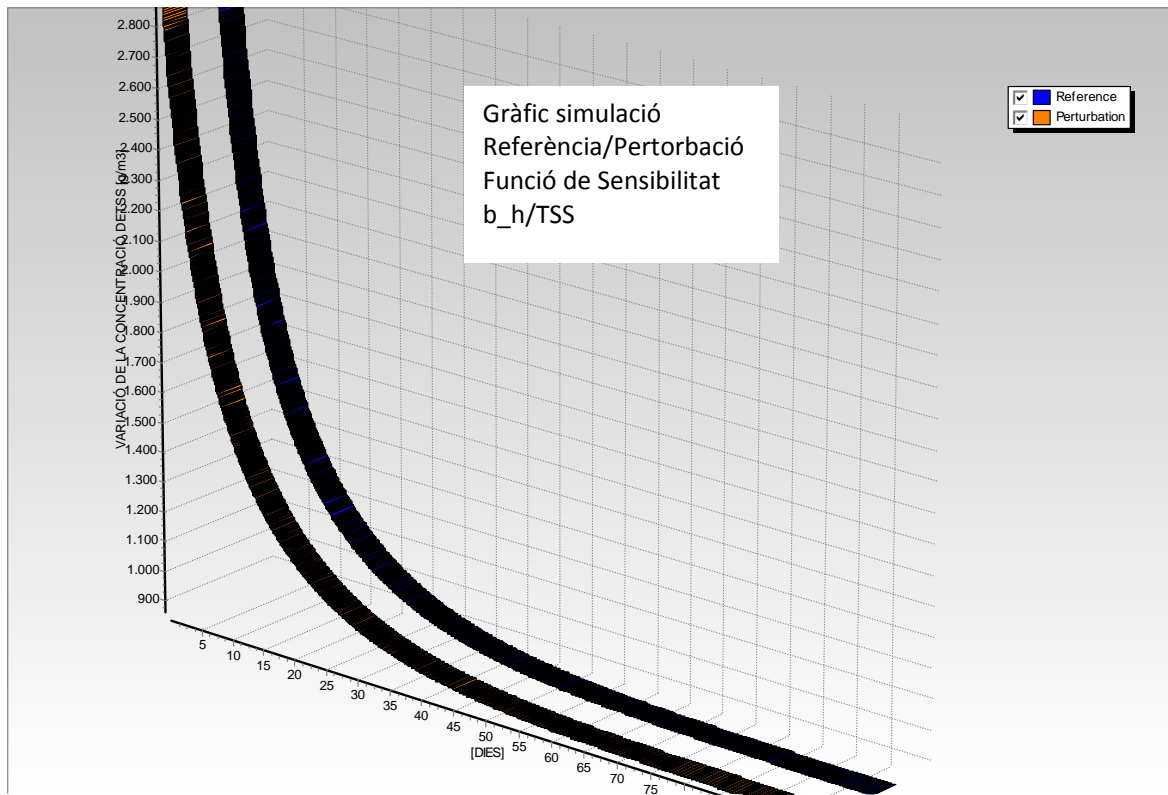


Figura 4.12: Gràfic de simulació referència/pertorbació.

En la figura 4.12 es pot comprovar la variació de concentració dels TSS en front del temps (període simulat de 100 dies), tant per la simulació de referència com per la simulació de pertorbació. La coincidència de les dues simulacions ens indica que el factor de pertorbació i el de control són adequats en aquest cas.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

A la figura 4.13 es pot observar la representació de la sensibilitat relativa de les corresponents funcions efectuades en el reactor biològic, per a la variable TSS.

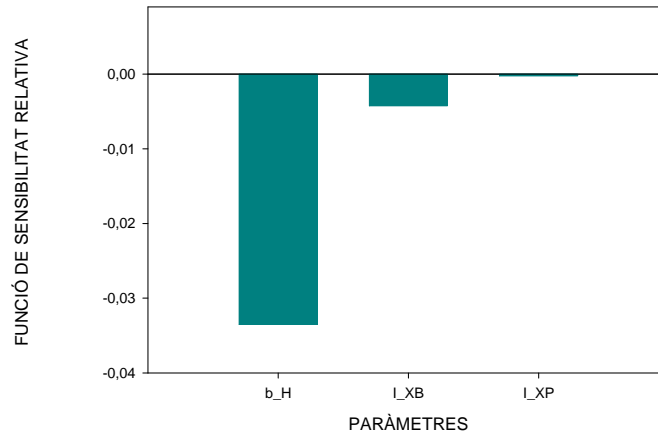


Figura 4.13: Sensibilitat relativa per a la variable TSS.

Dels resultats obtinguts es pot concloure que el paràmetre que presenta més sensibilitat relativa és la taxa de decaïment heterotròfic,  $b_{_H}$ , mentre que la fracció de nitrogen a la biomassa,  $I_{_XB}$ , i la fracció de nitrogen en els productes particulats,  $I_{_xp}$ , no es mostren particularment sensibles, a aquesta variable. Tots els paràmetres analitzats presenten una relació inversament proporcional respecte de la variable, és a dir un increment d'aquests paràmetres repercuteix en una disminució del valor de la variable. Rangs dels criteris de qualitat per a les funcions de sensibilitat i factor de perturbació òptima per el paràmetre seleccionat  $b_{_H}$ :

	Sensibilitat Relativa
Màxim error relatiu	$2,29 \cdot 10^{-5}$

- ANÀLISI DE SENSIBILITAT PER A LES FUNCIONS OD/(  $K_{OA}$ ,  $K_{OH}$ ,  $\eta_g$  i  $K_{La}$ )

Les simulacions per aquest anàlisi de sensibilitat s'han efectuat en els reactors aerobis (ASU-4 i ASU-5) utilitzant els valors de  $K_{La}$  de referència ( $10 \text{ h}^{-1}$  per ASU-4 i  $3,5 \text{ h}^{-1}$  per ASU-5). La figura 4.14 mostra els resultats obtinguts.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

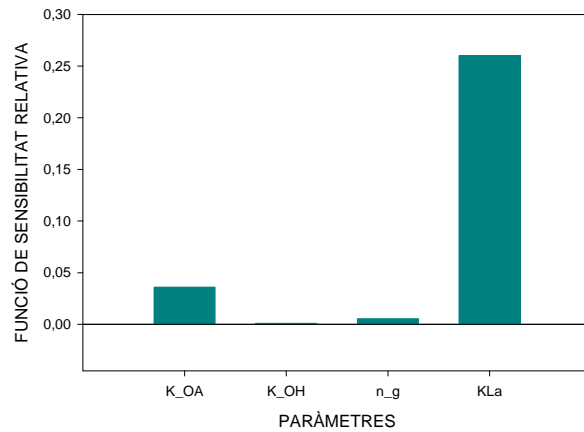


Figura 4.14: Sensibilitat relativa per a la variable OD. Zona aeròbia.

En aquest cas, el paràmetre  $K_{La}$  és el que es mostra més sensible respecte de la variable OD en la zona aeròbia del reactor biològic.

Rangs dels criteris de qualitat per a les funcions de sensibilitat i factor de pertorbació òptima per el paràmetre seleccionat  $K_{La}$ :

Sensibilitat Relativa  
Error relatiu màxim  $2.20 \cdot 10^{-6}$

- ANÀLISI DE SENSIBILITAT PER A LES FUNCIONS  $NH_4^+$  efluent/ $(\mu_{mA}, K_A, K_{NH})$ .

Per a la regulació de l'amoni en l'efluent s'aplica l'anàlisi de sensibilitat als paràmetres  $\mu_{mA}$ ,  $K_A$  i  $K_{NH}$ , tal com especifica el protocol utilitzat. La figura 4.15 mostra els resultats de l'anàlisi de sensibilitat per aquests paràmetres respecte de la variable concentració d'amoni en l'efluent de sortida.

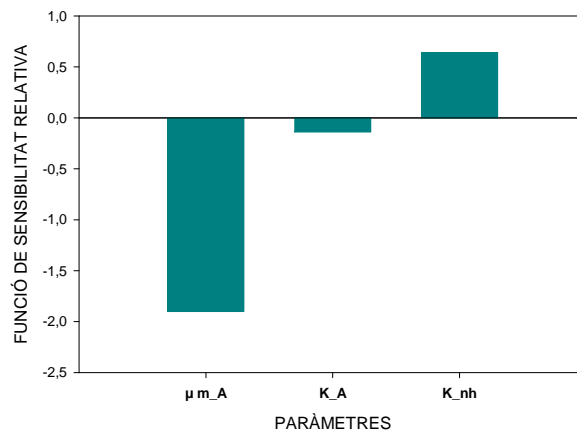


Figura 4.15: Sensibilitat relativa per a la variable  $NH_4^+$  en l'efluent.



## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Rangs dels criteris de qualitat per a les funcions de sensibilitat i factor de perturbació òptima per el paràmetre seleccionat  $\mu_{m\_A}$ :

Sensibilitat Relativa  
Error relatiu màxim 1,02

El paràmetre que es mostra més sensible a la variació d'amoní en l'efluent és el  $\mu_{m\_A}$  (màxim creixement autotròfic) seguida de  $K_{NH}$  (coeficient de semi-saturació amoni a biomassa autotròfica) mentre que el màxim grau d'amonificació ( $K_A$ ) resulta el paràmetre menys sensible.

- ANÀLISI DE SENSIBILITAT PER A LES FUNCIONS  $NO_3^-$  efluent/( $\eta_{h}$ ,  $K_x$ ,  $\mu_{m\_H}$ ,  $K_s$ ,  $K_{NO}$ )

Per a la variable nitrats en l'efluent de sortida, s'ha comprovat la sensibilitat respecte dels paràmetres  $\eta_{h}$  (factor de correcció per la hidròlisi anòxica),  $K_x$  (constant de saturació per a la hidròlisi),  $\mu_{m\_H}$  màxim creixement heterotròfic,  $K_s$  (constant de saturació per al creixement heterotròfic i  $K_{NO}$  (constant de saturació per als nitrats).

La figura 4.16 mostra el grau de sensibilitat d'aquests paràmetres respecte de la variable concentració de nitrats en l'efluent de sortida.

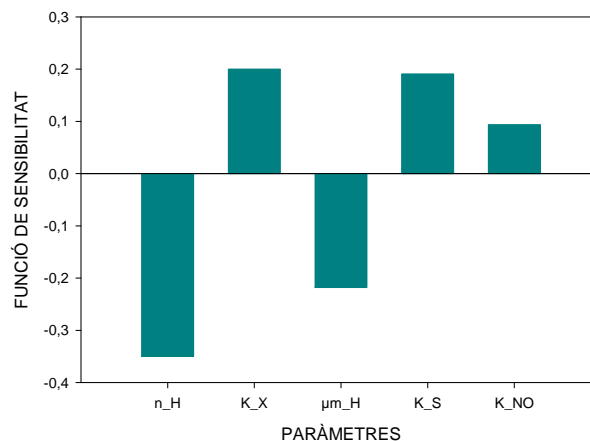


Figura 4.16: Sensibilitat relativa per a la variable  $NO_3^-$  en l'efluent.

El factor de correcció per a la hidròlisi anòxica és el paràmetre que presenta més influència sobre els canvis de la concentració de nitrats en l'efluent, seguida de la màxima velocitat de creixement dels microorganismes heteròtrofs,  $\mu_{m\_H}$ , de la constant de saturació d'hidròlisi del substrat lentament biodegradable,  $K_X$ , i del coeficient de semi-saturació de la biomassa heterotròfica,  $K_S$ , mentre que el coeficient de saturació de nitrats per a heteròtrofs nitrificants es mostra com el paràmetre menys sensible als canvis de la variable estudiada.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Rangs dels criteris de qualitat per a les funcions de sensibilitat i factor de perturbació òptima per el paràmetre seleccionat  $\eta_H$ :

Sensibilitat Relativa  
Error relatiu màxim 1

Una vegada detectats els paràmetres amb més influència sobre el canvi de les variables, es procedeix a efectuar el calibratge de la planta, seguint l'ordre establert en el protocol: una simulació en estat estacionari amb la finalitat d'ajustar els TSS i l'OD en els reactors aerobis i, una vegada calibrat aquest estat, s'efectua seguidament el calibratge en estat dinàmic de les fraccions nitrogenades en l'efluent (amoni i nitrats).

### 4.1.4.3.3. CALIBRATGE EN ESTAT ESTACIONARI

Per a la simulació en estat estacionari, es parteix dels valors per defecte de les constants cinètiques i estequiomètriques segons el model ASM1 i els valors de sortida que proporciona el model són comparats amb els valors de sortida de planta.

Els valors de la taula 4.6 són els corresponents a la mitjana dels paràmetres anuals de sortida de planta durant l'any 2009 i corresponen als valors de referència a què s'haurà d'ajustar el model per tal de considerar-lo calibrat. Els valors dels TSS en el reactor biològic, en una primera simulació, van resultar inferiors als valors mitjans de la planta. Tal com es desprèn de l'anàlisi de sensibilitat, la constant estequiomètrica,  $b_H$ , va ser variada fins permetre assolir un mateix ordre de magnitud per aquesta variable.

Degut al fet de disminuir el coeficient de decaïment dels microorganismes heteròtrofs i per tant l'aportació de matèria orgànica addicional procedent de la lisi cel·lular, la demanda d'OD es va veure alterada. Com a resultat d'aquesta variació, els valors dels coeficients globals de transferència d'oxigen van ser ajustats per a cada canal aerobi al valor de  $K_{La}$  corresponent de manera que permetia que cadascun dels reactors, intermedi i intern, disposés de la concentració d'OD del mateix ordre que els de l'EDAR. La taula 4.9, presenta la relació de canvis efectuats per tal d'assolir el calibratge de l'estat estacionari.

Taula: 4.9: Relació de canvis efectuats sobre constants cinètiques en el calibratge de l'estat estacionari.

CTE.	VALOR INICIAL (valor per defecte)	VALOR FINAL (valor aplicat segons Hauduc)
$b_H$	0,62 d <sup>-1</sup>	0,40 d <sup>-1</sup>
CTE.	VALOR INICIAL	VALOR FINAL
$K_{La}$ reactor intermedi	30 d <sup>-1</sup>	54 d <sup>-1</sup>
$K_{La}$ reactor intern	20 d <sup>-1</sup>	38 d <sup>-1</sup>

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Amb aquests canvis s'assoleix el calibratge inicial de l'estat estacionari. Els resultats obtinguts i la seva comparació amb els valors de sortida de planta s'inclouen a la taula 4.10.

Taula 4.10: Taula comparativa del calibratge en estat estacionari.

TAULA COMPARATIVA VARIABLES EN LA SIMULACIÓ EN ESTAT ESTACIONARI		
PARÀMETRE	SORTIDA MODEL	VALOR MITJANA ANUAL PLANTA
TSS BIOLÒGIC ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	3150	3129
O.D. REACTOR INTERMEDI ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2,8	2,9
OD REACTOR INTERN ( $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	4,9	4,7

### 4.1.4.3.4. CALIBRATGE EN ESTAT DINÀMIC

Partint del calibratge previ en estat estacionari, s'ha introduït l'influent dinàmic BSM1\_LT generat i s'han efectuat simulacions de 365 dies. Dels valors de sortida que dona el model en aquesta simulació s'observen discrepàncies entre els paràmetres  $\text{NH}_4^+$  i  $\text{NO}_3^-$ , els quals presenten valors inferiors als valors mitjans de sortida de l'EDAR. Seguint el protocol de calibratge i l'anàlisi de sensibilitat, una vegada comprovat que l'OD no es presenta com un factor limitant, per tal de compensar aquestes diferències, s'ha procedit a modificar alguns valors dels paràmetres cinètics amb influència sobre aquestes variables. Inicialment s'intenta calibrar la variable  $\text{NH}_4^+$  en l'efluent, segons protocol i una vegada assolit aquest, realitzar l'ajustament dels nitrats. Una vegada calibrat el contingut d'amoni en l'efluent es procedeix a calibrar el contingut de nitrats. Es comprova que, amb els valors modificats dels paràmetres, el model mostra concentracions de nitrats en l'efluent inferiors a les de sortida de planta. S'hauran de modificar, per tant, els paràmetres corresponents, per tal d'incrementar aquest valor a la sortida.

Per tal d'augmentar la concentració de nitrats en l'efluent, el factor de correcció de la hidròlisi anòxica,  $\eta_h$ , seria el més adequat de manera que una disminució d'aquest paràmetre comportaria una disminució de la disponibilitat de substrat fàcilment biodegradable i, per tant, una disminució del creixement heteròtrof en zona anòxica i, en conseqüència, una disminució de la desnitrificació. Això comportaria un increment dels nitrats, però el valor per defecte del model (0,4) té un valor inferior als proposats per Hauduc (2011) (0,5/0,6/0,75). Per tant, no es pot utilitzar aquest paràmetre per regular la variable desitjada.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Una manera més directa seria actuar sobre la velocitat màxima de creixement heterotròfic, que té com a valor per defecte (6) i com a valors proposats (4 i 5,7). Les simulacions amb els dos valors proposats, disminuint al màxim el creixement heterotròfic (valor 4 d<sup>-1</sup>), no arriba a aconseguir els valors de concentracions de nitrats a la sortida, el que fa necessari l'ús de la constant de saturació de la hidròlisi del substrat lentament biodegradable, augmentant el seu valor a fi de complementar la limitació del creixement heterotròfic. Aquest paràmetre s'augmenta de 0,03 (valor per defecte) a 0,15 i 0,17 (valors superiors d'entre els proposats). S'aconsegueix així un lleuger increment. La resta de paràmetres, com ara K<sub>S</sub> (coeficient de semi-saturació de la biomassa heterotròfica) i K<sub>NO</sub> (coeficient de saturació dels nitrats per a heteròtrofs nitrificants) no es poden utilitzar ja que no permeten l'augment que seria necessari respecte dels seus valors per defecte i els proposats. Cada variació dels valors de les constants ajustades en les simulacions en estat dinàmic ha anat precedida d'una simulació en estat estacionari.

En aquest cas ha estat necessari un ajustament dels valors de K<sub>La</sub>, que al final del calibratge han quedat fixats com a 54 d<sup>-1</sup> en el reactor intermedi i 46 d<sup>-1</sup> en el reactor intern. Per altra banda, els TSS calibrats inicialment en l'estat estacionari no s'han vist gaire afectats pels canvis dels valors de les constants descrites anteriorment, per la qual cosa no ha estat necessari el seu reajustament.

Els canvis efectuats sobre el valor de les constants cinètiques, per tal d'assolir els resultats del calibratge en estat dinàmic del model, es troben recopilats a la taula 4.11.

Taula 4.11: Relació de canvis efectuats sobre les constants cinètiques en el calibratge del model en estat dinàmic.

CTE.	VALOR INICIAL (valor per defecte)	VALOR FINAL (valor final)
μ <sub>m_H</sub>	6	4
K <sub>x</sub>	0,03	0,17

### 4.1.5. SIMULACIÓ I INTERPRETACIÓ DE RESULTATS

Els resultats assolits en la calibratge en estat dinàmic de la planta, amb les corresponents iteracions de l'estat estacionari per al manteniment dels TSS i de l'OD en els reactors biològics, s'han recopilat a la taula 4.12. En l'annex II es mostren les gràfiques amb els valors assolits pel model.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.12: Valors comparatius de sortida del model i els valors de planta. Simulació en estat dinàmic.

TAULA COMPARATIVA VALORS DE SORTIDA I REACTOR BIOLÒGIC EN LA SIMULACIÓ EN ESTAT DINÀMIC		
PARÀMETRES EN REACTOR BIOLÒGIC	SORTIDA MODEL	VALOR MITJANA ANUAL PLANTA
TSS (g·m <sup>-3</sup> )	3204	3129
OD REACTOR INTERMEDI (g·m <sup>-3</sup> )	2,8	2,9
OD REACTOR INTERN (g·m <sup>-3</sup> )	4,9	4,7
PARÀMETRES EN L'EFLUENT	SORTIDA MODEL	VALOR MITJANA ANUAL PLANTA
AMONI (g·m <sup>-3</sup> )	1,7	2,2
NITRATS (g·m <sup>-3</sup> )	7,2	9,0
DQO (g·m <sup>-3</sup> )	34,6	35,5
DBO (g·m <sup>-3</sup> )	1,4	1,8
TSS (g·m <sup>-3</sup> )	6,1	6,6

Per tal de comprovar estadísticament la validesa del calibratge, s'ha calculat per a cada paràmetre involucrat, l'error quadràtic mitjà (RMSE), el valor de l'RMSE normalitzat i l'error absolut mitjà (MAE), entre els valors d'aquests paràmetres que presenta la planta i els facilitats pel model.

On:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_{sim} - X_{planta})^2}{n}} \quad (4.1)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{max\ obs.} - X_{min\ obs.}} \quad (4.2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} |X_{sim} - X_{planta}| \quad (4.3)$$

La relació d'errors es troba resumida a la taula 4.13.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.13 : Relació del càlcul d'errors en el calibratge del model de planta.

PARÀMETRE	RMSE	NRMSE	MAE
$\text{NH}_4^+$	2,05	0,15	1,24
$\text{NO}_3^-$	2,29	0,08	2,83
TSS	0,62	0,13	0,28

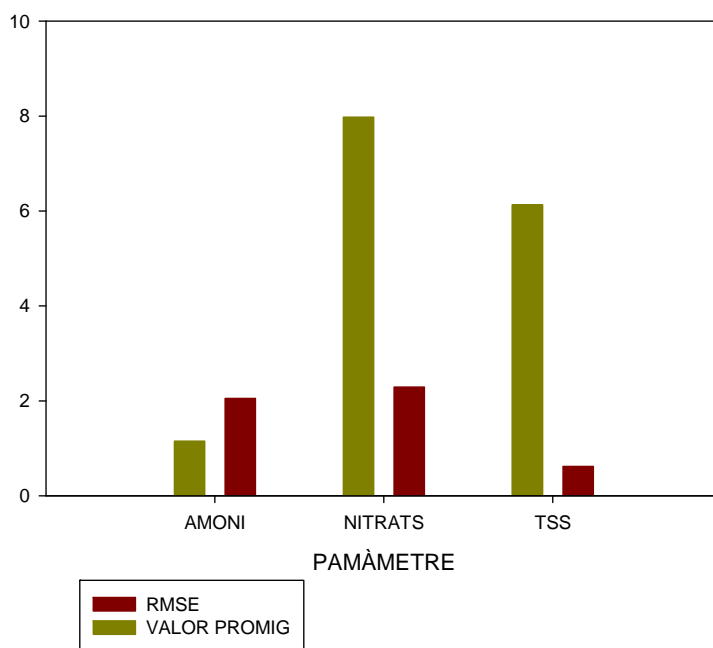


Figura 4.17: Comparació dels valors mitjans i dels errors quadràtics pels paràmetres considerats.

Per altra banda, la figura 4.18 mostra la comparació entre els diferents valors de sortida d'amoni, nitrats i TSS de la planta en front dels valors obtinguts en el model i en la figura 4.19 s'han representat els valors de sortida del model en front dels valors reals de la planta.

Gràcies al protocol de calibratge utilitzat i, en part, gràcies als valors extrets de Hauduc (2011) i considerant els valors d'errors calculats, es pot considerar que s'ha assolit un bon calibratge del model de planta.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

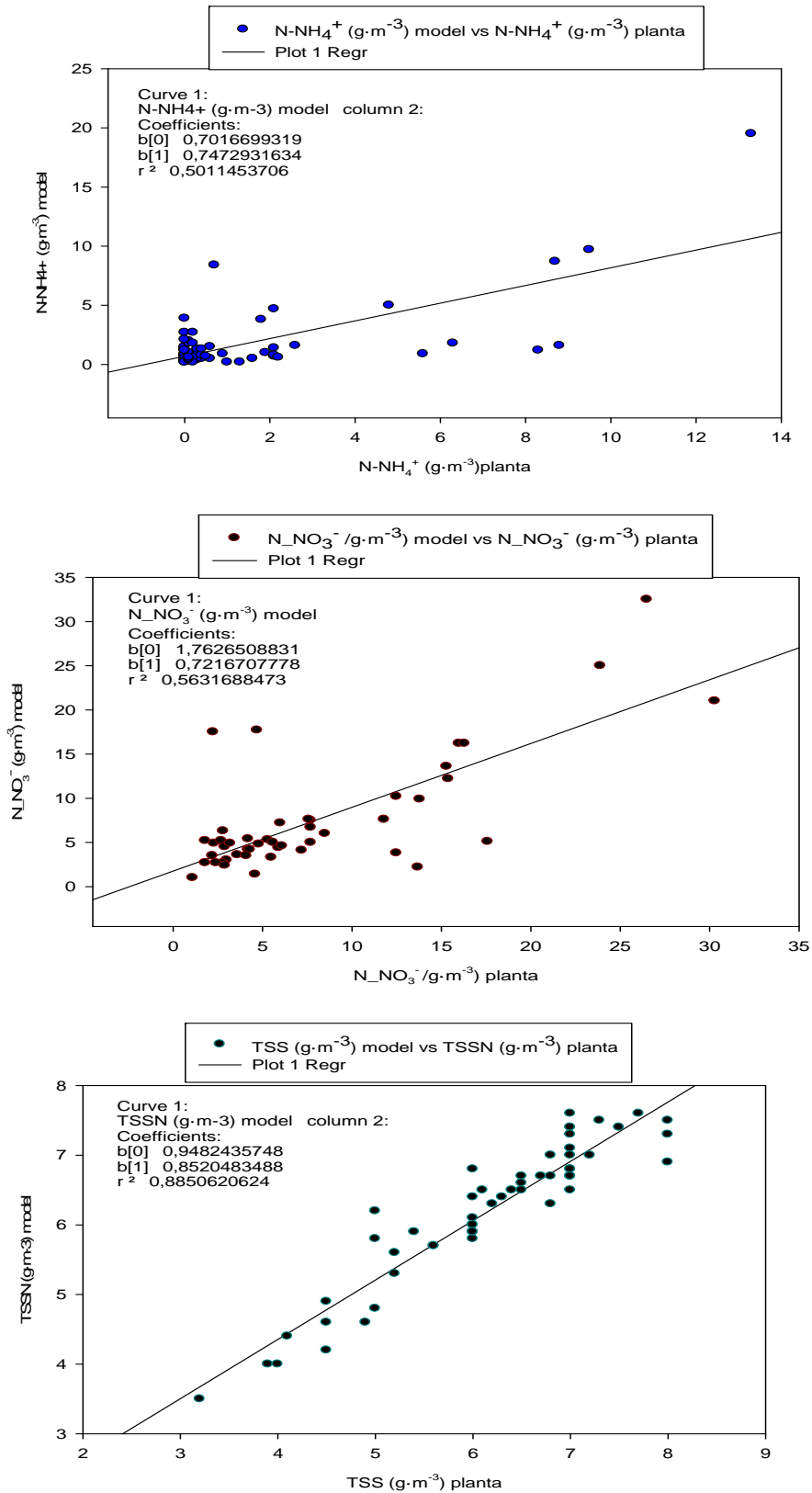


Figura 4.18: Comparació entre els valors de sortida de la planta i els valors de sortida del model.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

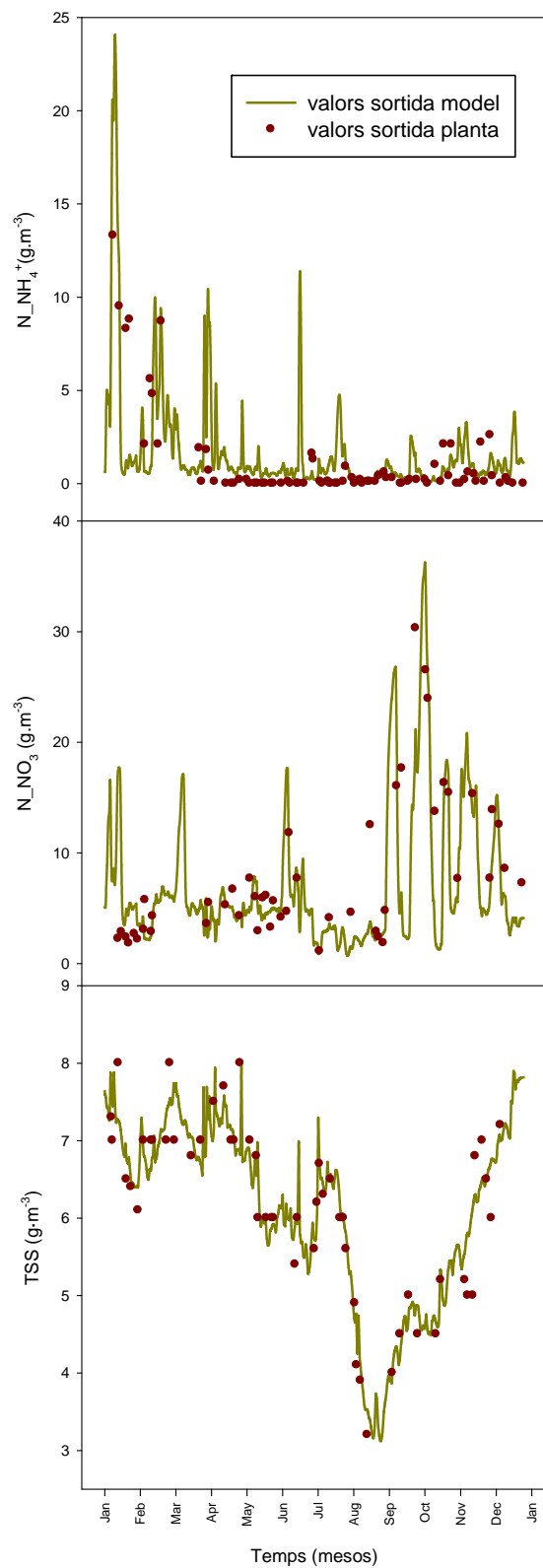


Figura 4.19: Evolució de la concentració d'amoni, nitrats i TSS en l'efluent. Simulació en estat dinàmic.



## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

---

Del calibratge en dinàmic s'ha pogut observar que el model ha estat capaç de descriure l'increment de nitrats per manca de matèria orgànica i ha seguit la dinàmica dels sòlids al llarg de l'any estudiat.

Una vegada assolit el calibratge del model, es pot procedir a efectuar les diferents simulacions per tal d'escollir el sistema de control més adequat que permeti assolir els objectius preestablerts, com ara la millora de la desnitrificació i l'estalvi econòmic en el procés d'aeració.

### 4.2 ESTRATÈGIES PER A LA REDUCCIÓ DELS COSTOS ENERGÈTICS A L'EDAR DE LA VALL DEL GES

#### 4.2.1. UTILITZACIÓ D'UN TANC PULMÓ

Una de les estratègies aconsellades per experts i alguns autors (Leu et al., 2009) per tal assolir un estalvi energètic en l'aeració és la basada en la utilització de tancs pulmó que permetin l'emmagatzematge de les puntes de cabal que arriben a l'EDAR durant el dia, per ésser tractades al llarg de la nit, que té les tarifes més baixes. En aquest sentit, s'ha efectuat un estudi d'aquesta alternativa per tal de preveure si podria ser aplicada posteriorment.

Inicialment i per tal de que aquesta estratègia no presenti limitacions físiques ni econòmiques, s'efectua un càlcul del volum d'aigua residual provinent dels cabals punta a emmagatzemar durant el període de 8h00 a 24h00 per tal de poder dimensionar el tanc i calcular-ne els costos de construcció.

Amb aquest criteri s'han determinat tres opcions de treball.

- Per a la primera opció s'ha calculat el total de volum punta, agafant com a referència la mediana del cabal total diari calculada per l'influent dinàmic, seleccionant-se un volum capaç d'emmagatzemar al menys el 95% de les puntes diàries rebudes, resultant un valor aproximat de 600 m<sup>3</sup>.
- La segona opció deixaria un marge de tolerància del 6% respecte de la mediana i, amb el mateix criteri de capacitat d'emmagatzematge, resulta un volum requerit al voltant de 800 m<sup>3</sup>.
- Per a la tercera opció s'opta per deixar una tolerància del 10% respecte de la mediana i el volum seleccionat, deixant el mateix criteri de capacitat d'emmagatzematge, seria al voltant de 900 m<sup>3</sup>.

Els volums diaris que es precisaria emmagatzemar es mostren a la gràfica 4.20 on s'hi troben inclosos el volum diari acumulat, la referència utilitzada pel càlcul de les puntes acumulades i el volum del dipòsit seleccionat.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

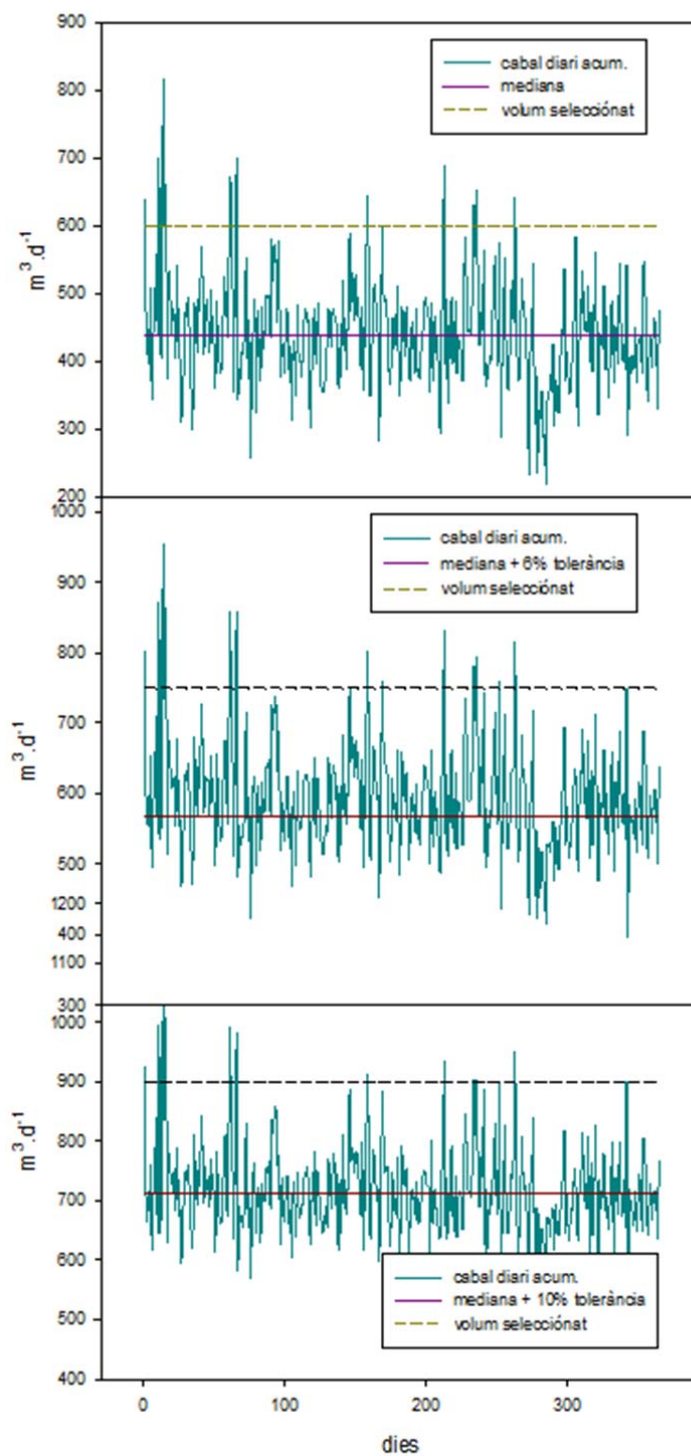


Figura 4.20: Exigències de volum per l'emmagatzematge de puntes.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

---

També s'ha comprovat que el volum acumulat durant el dia conjuntament amb el cabal nocturn no sobrepassés el cabal de disseny de la planta a fi d'evitar possibles problemes de desestabilització.

A la figura AI.1 de l'apèndix es mostren per a les tres opcions els cabals punta calculats a partir del volum acumulat durant el dia i per alimentar el reactor biològic al llarg de les 8 hores nocturnes (de 0h00 a 8h00). El cabal total a tractar s'ha determinat a partir de la suma dels cabals punta i la mitjana de cabal que presentava aquest període nocturn. Com es pot observar a la figura AI.2 de l'apèndix, en cap moment la suma del cabal nocturn i els cabals punta alimentats sobrepassen el cabal de disseny de l'EDAR. Per tant respecte del cabal, l'opció de la utilització del tanc pulmó no alteraria el funcionament de la planta.

Les simulacions posteriors sobre la planta modelitzada podrien donar una referència del seu comportament i de l'assoliment dels percentatges de depuració en cadascun dels tres casos proposats, així com l'índex de qualitat de l'efluent i sobretot dels costos d'aeració, la disminució dels quals pot fer factible aquesta estratègia.

La disminució significativa d'aquests costos pot suposar un període de retorn que serà decisiu alhora de seleccionar les dimensions del tanc més apropiat o de la pròpia estratègia.

### 4.2.2. AVALUACIÓ DE COSTOS DELS DIPÒSITS PER A LES OPCIONS PRESENTADES

Dels tres volums proposats, se seleccionaria l'òptim des del punt de vista econòmic, es a dir el que presentés un millor període de retorn de la inversió que la instal·lació suposa. Per tant, seria necessari el càlcul de costos de construcció i dels equips que es precisen en cada cas (sistema de bombament, la pròpia instal·lació elèctrica i el sistema d'agitació).

Per avaluar els pressupostos dels dipòsits, es podrien considerar dues possibilitats:

- que aquests fossin executats amb obra, o bé
- mitjançant la utilització de mòduls prefabricats.

En tots dos casos el material a utilitzar seria formigó armat amb una capa d'impermeabilització interior. La seva geometria seria circular i la seva disposició o bé soterrada o bé aèria. En tots els casos els dipòsits es trobarien coberts per tal d'evitar problemes d'olors i facilitar la instal·lació d'agitadors verticals i canalització de bombaments.

Les taules 4.14 i 4.15, presenten els costos de la primera opció (tanc de cabuda 600 m<sup>3</sup>), pel dipòsit soterrat i per les dues opcions de construcció: mòduls prefabricats o bé d'execució d'obra.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.14: Pressupost per al tanc d'emmagatzematge segons opció 1. Utilització de mòduls prefabricats.

PRESSUPOST PER TANC EMMAGATZEMATGE SOTERRAT (OPCIÓ 1). UTILITZACIÓ DE MÒDULS PREFABRICATS						
Dimensions Ø 12,5 m i 5 m alçada , Volum útil 590 m <sup>3</sup>						
PRESSUPOST DIPÒSIT		Amidaments (m <sup>3</sup> )	Quantitat	Preus (€/m <sup>3</sup> )	Import (€)	
<b>MOVIMENT DE TERRES</b>	m <sup>3</sup> excavació a cel obert	Vas dipòsit 715,69				
		Llosa base 54,32	770,01	7,29	5613,37	
	m <sup>3</sup> re ompliment amb terres pròpies extradós mur		102,10	20,85	2128,79	<b>7742,16</b>
<b>FONAMENTACIÓ</b>	m <sup>2</sup> capa formigó de neteja 10 cm		130,70	11,92	1557,94	
	m <sup>3</sup> formigonat a llosa de base Profunditat llosa base 0,32 m		41,25	101,96	4205,85	
	Kg acer armat a llosa base		650,61	1,41	917,36	
	m <sup>2</sup> mallàs Ø 6 mm c/15 cm		245,00	4,44	1087,80	
						<b>7768,95</b>
<b>ESTRUCTURA DIPÒSIT</b>	Ut subministrament, muntatge i segellat dipòsit		1	44735,10		<b>44735,10</b>
<b>ALTRES</b>	Ut connexions instal·lacions		1	400	400	<b>400</b>
<b>TOTAL DIPÒSIT</b>						<b>60246,21</b>

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.15: Pressupost per al tanc d'emmagatzematge segons opció 1. Execució d'obra.

PRESSUPOST PER TANC EMMAGATZEMATGE SOTERRAT (OPCIÓ 1). MODALITAT EXECUCIÓ D'OBRA						
Dimensions Ø 12,5 m i 5 m alçada . Volum útil 600 m <sup>3</sup>						
PRESSUPOST DIPÒSIT		Amidaments (m <sup>3</sup> )	Quantitat	Preus (€/m <sup>3</sup> )	Import (€)	
<b>MOVIMENT DE TERRES</b>	m <sup>3</sup> excavació a cel obert	Vas dipòsit 715,69				
		Llosa base 54,32	770,01	7,29	5613,37	
	m <sup>3</sup> reompliment amb terres pròpies extradós mur		102,10	20,85	2128,79	<b>7742,16</b>
<b>FONAMENTACIÓ</b>	m <sup>2</sup> capa formigó de neteja 10 cm		130,70	11,92	1557,94	
	m <sup>3</sup> formigonat a llosa de base Profunditat llosa base 0,34 m		61,41	116	7123,60	
	Armat perimetral i cadiretes Kg acer armat Ø 15□2		2.277,7	1,10	2505,47	<b>11187,01</b>
<b>ALÇAT PARETS</b>	kg Acer Ø 15□2 i coronament Ø 20 x 5 m		2.582,07	1,10	2840,28	
	m <sup>3</sup> formigó (25 cm gruix)		48	105,48	5063	
	m <sup>2</sup> encofrat a dues cares		108,5	30,64	3324	<b>11227,28</b>
<b>TAPA CORONAMENT</b>			2.323	1,10	2255	
			61,5	105,46	6485,79	<b>8740,79</b>

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

<b>ESTRUCTURA DIPÒSIT</b>	Ut subministrament muntatge i segellat dipòsit		1	37917,05	37917,05	<b>37917,05</b>
<b>ALTRES</b>	2% imprevistos sobre el total		1			<b>1537,28</b>
<b>TOTAL DIPÒSIT</b>						<b>78351,57</b>

(\*) En els pressupostos presentats no s'han comptabilitzat la càrrega i el transport de terres ni el cost d'abocament controlat, perquè es considera que aquestes seran repartides i anivellades sobre un terreny veïnal de la pròpia EDAR.

(\*) Tampoc s'ha comptabilitzat l'IVA corresponent degut a que pot ser retornat a l'empresa al llarg del mateix any i per tant no interfereix en el càlcul del retorn.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

---

La comparació d'ambdós pressupostos faria desestimar l'opció d'un dipòsit d'obra per la clara diferència de preus. S'hauria de considerar també que les dues possibilitats presenten un temps de vida semblant, que en tots dos casos i segons els constructors, en tractar-se del mateix material, es mou al voltant dels 20 anys. Per altra banda, s'observa que l'apartat de moviment de terres incrementa molt el pressupost total, per la qual cosa l'anàlisi de possibilitats es limitaria als dipòsits aeris. Les opcions queden doncs restringides a tres possibilitats: tres volums de dipòsits aeris construïts amb mòduls prefabricats i en disposició aèria. En el cas de l'EDAR de La Vall del Ges no presentaria restriccions físiques ja que disposa d'espai suficient per ubicar qualsevol de les opcions presentades. La taula 4.16 presenta els costos de construcció i equipaments necessaris per a una de les opcions presentades, mentre que les taules per a la resta d'opcions s'inclouen en les taules AI.1, AI.2 de l'apèndix .

En el cas d'utilitzar la construcció modular, les dimensions dels mòduls limiten el volum escollit de forma que en el cas de la primera opció el dipòsit no pot cobrir els 600 m<sup>3</sup> seleccionats, però la combinació d'alçada i diàmetres fan que s'aproximi al màxim a aquesta cabuda (590 m<sup>3</sup>). Aquesta contingència també es presenta per als dos casos restants. A la segona opció, en comptes dels 750 m<sup>3</sup> escollits, el dipòsit haurà de cubicar 849 m<sup>3</sup> i per la tercera opció haurà de ser de 880 en comptes dels 900 m<sup>3</sup> seleccionats.

L'inconvenient respecte a les limitacions de volum que presenta la construcció amb mòduls es veu compensada per la facilitat d'incrementar el seu volum de forma fàcil i molt econòmica.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.16: Pressupost total per a l' opció 1. Construcció i equipaments.

PRESSUPOST PER TANC EMMAGATZEMATGE I EQUIPAMENTS (OPCIÓ 1) DIPÒSIT AERI MÒDULS PREFABRICATS					
Dimensions Ø 12,5 m i 5 m alçada , Volum útil 590 m <sup>3</sup>					
		Quantitat	Preu (€/m <sup>3</sup> )	Import (€)	
FONAMEN TACIÓ	m <sup>2</sup> capa formigó de neteja (10 cm)	130,70	11,92	1557,94	<b>7768,95</b>
	m <sup>3</sup> formigonat a llosa de base Profunditat llosa base 0,32 m	41,25	101,96	4205,85	
	Kg acer armat a llosa	650,61	1,41	917,36	
	m <sup>2</sup> mallàs Ø 6mm c/15 cm	245,00	4,44	1087,80	
<b>ESTRUCTURA DIPÒSIT</b>	Ut subministrament, muntatge i segellat dipòsit	1	44735,10		<b>44735,10</b>
<b>ALTRES</b>	Ut connexions instal·lacions	1	400	400	<b>400</b>
<b>TOTAL DIPÒSIT</b>					<b>52904,05</b>
<b>SISTEMA DE BOMBAMENT</b>					
Bomba GRUNDFOS, Ref. SL1.80.100.55 Codi 96873360 Amb suports, tubs guia i caldereria individual interior del dipòsit				8500	<b>8500</b>
Conjunt sistema de mesura de nivell a l'interior del dipòsit				1630	<b>1630</b>
Conjunt vàlvules i carrets de desmuntatge individual				1962	<b>1962</b>
Canonada de polietilè PN-6 Ø 200 mm. Electrosoldada, transport, treball i part d'accessoris proporcional (50 m. Longitud)				1315	<b>1315</b>
Quadre elèctric de control i variadors externs: Armari polièster Himel PLM 86 doble porta Conjunt disjuntors tèrmics potència graduable, disjuntors maniobra, trafo Variador OMRON classificació IP-54 externs Estructura inoxidable comú per a tots els elements (muntatge mural)				4557	<b>4557</b>
<b>TOTAL SISTEMA BOMBAMENT I ACCESSORIS</b>					<b>17964</b>
<b>SISTEMA D'AGITACIÓ</b>					
Agitador horitzontal submergible inoxidable Model CRI-MAN Potència en el eix 50 Hz, 2,2 kW. hèlix 3 pales, Ø 210 mm amb anella canalització		3100			<b>3100</b>
Barra guia per agitador		1753			<b>1753</b>
<b>TOTAL SISTEMA D'AGITACIÓ</b>					<b>4853</b>
<b>TOTAL PRESSUPOST OPCIÓ 1</b>					<b>75721,05</b>



## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

La taula 4.17 inclou la relació de costos totals (construcció i equipaments) de les tres opcions de volums per dipòsit aeri i construcció modular.

Taula 4.17: Relació de costos totals segons opcions tanc emmagatzematge. Dipòsit aeri i construcció modular.

DIPÒSIT	COST TOTAL (€)
OPCIÓ (1) VOLUM 590 m <sup>3</sup>	75721
OPCIÓ (2) VOLUM 849 m <sup>3</sup>	102393
OPCIÓ (3) VOLUM 880 m <sup>3</sup>	108048

### 4.2.3. AVALUACIÓ DE LES INVERSIONS PER A LES OPCIONS PRESENTADES

S'ha calculat el VAN i el període de retorn per a cada una de les opcions proposades tal de comprovar la seva viabilitat econòmica.

A partir de la relació de consums elèctrics i costos d'aeració presentats a la taula 1.2, s'han estimat els costos d'aeració del volum acumulat en els casos de que fos tractat amb període diürn o bé nocturn, mitjançant la utilització del valor dels kWh/m<sup>3</sup> d'aigua sotmesa a aeració i considerant que durant el període nocturn el cost de l'energia es troba en hores vall. Dels consums d'aeració per m<sup>3</sup> presentats a la taula 1.2 es pot observar que el consum d'energia destinada a l'aeració de l'aigua residual varia en funció del mes. Això és degut als diferents períodes tarifaris i a les combinacions d'aquets períodes en temporades altes mitjanes o baixes i també en funció del mes i l'assignació dels d'interval punta, pla i vall que aquesta distribució comporta.

Si es considera que l'EDAR continua treballant amb aquesta modalitat de tarifes, per altra banda molt optimitzades, la diferència de costos entre el tractament del volum de puntes acumulat durant el dia i l'estalvi que s'assoliria en ser tractat en hores vall es podria determinar per mesos per fer més comparatiu l'estalvi energètic de l'aeració.

Com que es disposa del volum diari de puntes recollides, es pot trobar fàcilment el volum mensual que es tractarà en període nocturn.

Es partirà de dues consideracions per calcular el cost d'aeració del volum acumulat en període diürn:

- Cas A en què el volum acumulat sigui tractat en hores punta. (0,117241€/kWh)
- Cas B en què el volum acumulat sigui tractat en hores pla. (0,084506 €/kWh)

L'avaluació de l'estalvi energètic que comportaria la primera opció es mostra a la taula 4.18, i els càlculs del VAN i el període de retorn a la taula 4.19. Les avaluacions corresponents a les dues opcions restants es troben incloses a les taules AI.5 i AI.6 de l'apèndix.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.18: Relació de volums i costos d'aeració per opció 1.

RELACIÓ DE VOLUMS I COSTOS D'AERACIÓ SEGONS MESOS opció tanc (1)								
MES	kWh/m <sup>3</sup> aeració	Volum punes tractat (m <sup>3</sup> )	kWh totals consumits	Cost aeració diürn hores punta cas(A) 0,117241€/kWh	Cost del tractament diürn hores pla (cas B) 0,106157 €/kWh	Cost del tractament nocturn hores vall 0,084506 €/kWh	Estalvi assolit cas (A)	Estalvi assolit cas (B)
<b>Gener</b>	0,34	15.332	5212,88	611,16	553,38	440,52	170,64	112,86
<b>Febrer</b>	0,34	12.489	4246,26	497,84	450,77	358,83	139,00	91,94
<b>Març</b>	0,40	14.386	5754,40	674,65	610,87	486,28	188,37	124,59
<b>Abril</b>	0,42	13.094	5499,48	644,76	583,81	464,74	180,03	119,07
<b>Maig</b>	0,41	13.836	5672,76	665,08	602,20	479,38	185,70	122,82
<b>Juny</b>	0,45	13.893	6251,85	732,97	663,68	528,32	204,65	135,36
<b>Juliol</b>	0,43	13.503	5806,29	680,74	616,38	490,67	190,07	125,71
<b>Agost</b>	0,57	14.296	8148,72	955,36	865,04	688,62	266,75	176,43
<b>Setembre</b>	0,45	13.334	6000,30	703,48	636,97	507,06	196,42	129,91
<b>Octubre</b>	0,47	11.673	5486,31	643,22	582,41	463,63	179,59	118,78
<b>Novem.</b>	0,47	13.019	6118,93	717,39	649,57	517,09	200,30	132,48
<b>Desembre</b>	0,45	13.394	6027,30	706,65	639,84	509,34	197,30	130,50
<b>TOTAL ESTALVI ANUAL PER OPCIÓ 1</b>							<b>2298,83</b>	<b>1520,45</b>

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.19: Càlcul del VAN i PR per opció (1). Dipòsit 590 m<sup>3</sup> aeri.

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	-75721€															
FC		2298,83	2298,83	2298,83	2298,83	2298,83	2298,83	2298,83	2298,83	2298,83	2298,83	2298,83	2298,83	2298,83	2298,83	2298,83
r	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%
(1+r) <sup>n</sup>	1	1,075	1,156	1,242	1,335	1,436	1,543	1,659	1,783	1,917	2,061	2,216	2,382	2,560	2,752	2,959
1/(1+r) <sup>n</sup>	1	0,93	0,86	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,56	0,52	0,48	0,45	0,42	0,39	0,36	0,34
FCd	-75721€	2138,45	1988,61	1.850,91	1721,97	1600,86	1489,84	1385,67	1289,30	1199,18	1115,39	1037,38	965,08	897,98	835,33	776,89
n		16	17	18	19	20										
FC		2298,83	2298,83	2298,83	2298,83	2298,83										
r		7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%										
(1+r) <sup>n</sup>		3,18	3,42	3,67	3,95	4,25										
1/(1+r) <sup>n</sup>		0,31	0,29	0,27	0,25	0,23										
FCd		722,90	672,17	626,38	581,98	540,90										

Càlcul del VAN = -A + [ FC/(1+r)<sup>1</sup> + FC/(1+r)<sup>2</sup> + FC/(1+r)<sup>3</sup> + ..... FC/(1+r)<sup>n</sup> ]

A= Import total inversió FC: Fluxos de caixa en aquest cas estalvi econòmic r= cost del capital (es comptabilitza una mitjana del 7,5% al llarg dels 20 anys de vida de la inversió)

1/(1+r)<sup>n</sup> = factor de descompte per aquest tipus d'interès i aquest nombre d'anys FCd = Fluxos de caixa descomptats (estalvi econòmic net)

**VAN = -75721+23437,20 =- 52283,8. VAN < 0 INVERSIÓ NO RECOMANABLE**

Període de retorn (PR)

n	A	FC	Fcac
1	75.721€		
2		2298,83	2298,83
3		2298,83	4597,66
4		2298,83	6896,49
5		2298,83	9195,32
6		2298,83	11494,15
7		2298,83	13792,98
8		2298,83	16091,81
9		2298,83	18390,64
10		2298,83	20689,47
11		2298,83	22988,3
12		2298,83	25287,13

n= nombre d'anys A=inversió inicial FC Fluxos de caixa anuals Fcac = Fluxos de caixa acumulats Recomanable un PR comprès entre 2 i 4 anys ( INVERSIÓ NO VIABLE).

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

La taula 4.20 conté un resum dels valors del VAN i del PR per a cadascuna de les opcions presentades.

Taula 4.20: Relació de valors de VAN i PR per a les 3 opcions presentades.

DIPÒSIT	VAN (€)	TIR (anys)
OPCIÓ (1) VOLUM 590 m <sup>3</sup>	-52284	33
OPCIÓ (2) VOLUM 849 m <sup>3</sup>	-71130	33
OPCIÓ (3) VOLUM 880 m <sup>3</sup>	-70252	29

Els resultats de l'avaluació per aquestes possibles estratègies no es presenten favorables per ésser aplicades a l'EDAR de la Vall del Ges, ja que la inversió no resulta rendible i els períodes de retorn es presenten en tots els casos superiors al temps de vida de la inversió. Per tant només seria possible per estalvis energètics elevats tal com es pot observar a la figura 1.21 que representa el VAN pels diferents volums de dipòsits i calculat considerant un període de retorn de 4 anys.

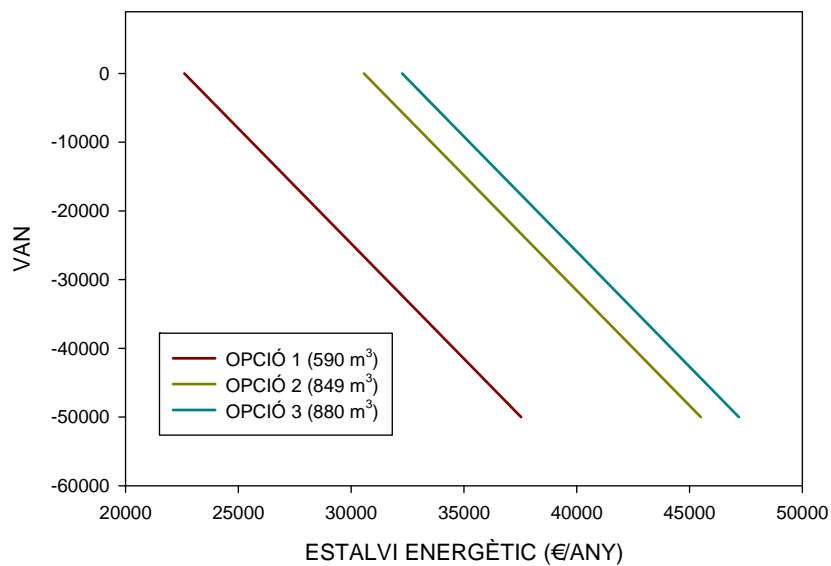


Figura 4.21: Variació del VAN en funció de l'estalvi energètic per a les tres opcions d'inversió estudiades.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

---

Es desestima aprofundir més en aquesta estratègia ja que de les avaluacions prèvies se'n desprèn que aquesta només seria aplicable a una EDAR amb cabals d'entrada molt més elevats. A partir d'un valor actual net mínim (VAN=0), es a dir, que els fluxos de caixa equiparessin el nivell d'inversió en un període de 4 anys, es calcula que el cabal de puntes tractat hauria d'ésser 10 vegades superior a l'emmagatzemat en aquesta planta. Aquest raonament concordaria amb el càlcul del temps de retenció hidràulic (TRH teòric) en què treballaria la planta i que correspondria a  $(8000 \text{ m}^3)/6000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1} = 32$  hores. S'observa que presenta un valor força elevat respecte dels valors estàndard d'aquest paràmetre i que en realitat algunes vegades el superaria (considerant que el cabal mitjà anual és de  $4584 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ). Probablement aquest factor presenta repercussions negatives per tal de poder aplicar aquesta estratègia.

Com que una estratègia basada en noves infraestructures no és la més aplicable en aquesta EDAR, s'ha consultat quines propostes recomanaven altres autors per a la millora de l'estalvi energètic en aquests casos i s'ha comprovat que una gran majoria opten per sistemes menys costosos i basats en controladors. En conseqüència, s'intueix que el control i l'automatització per aquesta EDAR es presenta com una solució més sostenible que l'estratègia anteriorment presentada.

### 4.3. SELECCIÓ DEL SISTEMA DE CONTROL

Els diferents sistemes de control estudiats per l'EDAR de la Vall del Ges han estat desenvolupats amb criteris de màxima facilitat d'operació, iniciant-se amb el sistema més senzill de control i desenvolupant de forma progressiva altres estratègies, fins aconseguir, a partir de la seva avaluació, la constatació de la seva validesa respecte als objectius a assolir. Però per tal de d'establir dades comparatives amb l'actual sistema de treball, s'obtenen prèviament els índexs d'avaluació de la planta amb les condicions d'operació actuals. Així doncs s'han seleccionat una sèrie d'estratègies que inclouen des d'un sistema senzill de control d'OD en el reactor ASU-4 fins a estratègies que actuen mitjançant la utilització de sensors per al seguiment de la variable controlada. Es comprova la resposta d'aquestes a partir de les simulacions del model calibrat.

#### 4.3.1. SIMULACIÓ EN *OPEN-LOOP*. SISTEMA ACTUAL D'OPERACIÓ DE L'EDAR

La figura 4.22 mostra el diagrama de l'EDAR representada en el programa WEST® per a l'actual sistema de treball de l'EDAR. El disseny ha estat construït a partir de la biblioteca de nodes descrits en el apartat 3.5 del capítol 3.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

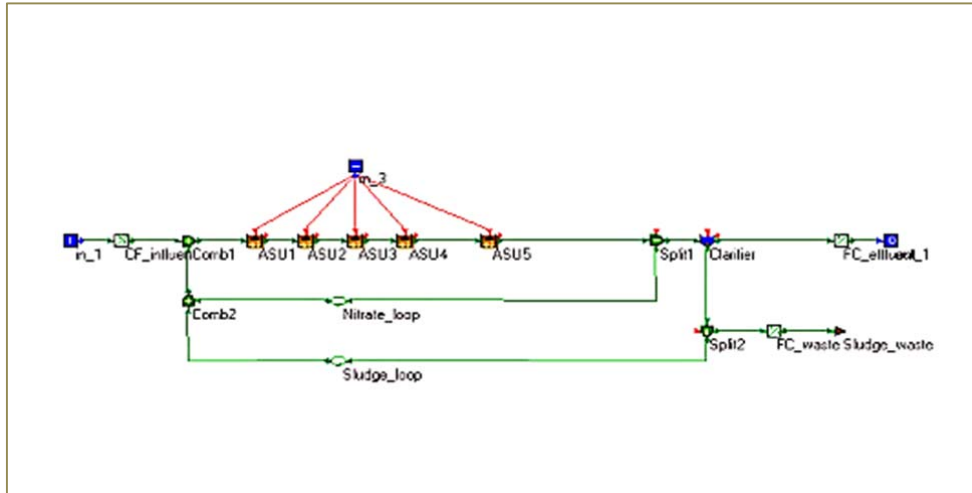


Figura 4.22: Configuració de l'EDAR en modalitat *OPEN-LOOP*. Programa West™.

La simulació en estat dinàmic del sistema de referència, a partir de les constants modificades segons calibratge, facilità els índexs d'avaluació incorporats a la taula 4.21. En l'apartat d'avaluació ambiental s'ha inclòs el terme complementari de probabilitat d'incompliment que ha facilitat el mòdul inspector. Els valors calculats pel model s'adjunten a l'apèndix . L'influent utilitzat és l'indicat en l'apartat 4.1.4.2.

Taula 4.21: Resultats de la simulació en estat dinàmic. Modalitat *OPEN-LOOP*.

RESULTATS OBTINGUTS EN LA SIMULACIÓ DINÀMICA . CONDICIONS OPENLOOP		
	IQE (kg contaminant·d <sup>-1</sup> )	987
TERMES D'ACOMPLIMENT AMBIENTAL	N total (nombre de vegades que s'ha superat el límit)	6
	N total (% sobre el temps avaluat que es mantenen aquests valors fora de límit)	7,9
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (nombre de vegades que s'ha superat el límit)	18
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (% del temps avaluat que es mantenen aquests valors fora de límit)	32,6
	Probabilitat d'incompliment (%)	18,4
TERMES D'AVALUACIÓ ECONÒMICA	Producció de fangs (kg·d <sup>-1</sup> )	1136
	Energia de bombament (kW·h·d <sup>-1</sup> )	139
	Energia d'aeració (kW·h·d <sup>-1</sup> )	768
	Energia de mescla (kW·h·d <sup>-1</sup> )	595
	Índex OCI	6863,6

\*(Valor límit del model per a la comparació de l'N total =18 g d'N·m<sup>-3</sup>)

\*(Valor límit del model per a la comparació de l'NH<sub>4</sub><sup>+</sup> = 4 g d'N·m<sup>-3</sup>)

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Els resultats de concentracions d'amoni i de nitrats en l'efluent obtinguts en la simulació en Open-Loop, han estat relacionats amb l'energia consumida en l'aeració. A la gràfica 4.23, es pot comprovar que durant l'any estudiat, i per el sistema actual de treball de l'EDAR, el manteniment dels valors d'aquests components nitrogenats en l'efluent representa un consum d'energia considerable.

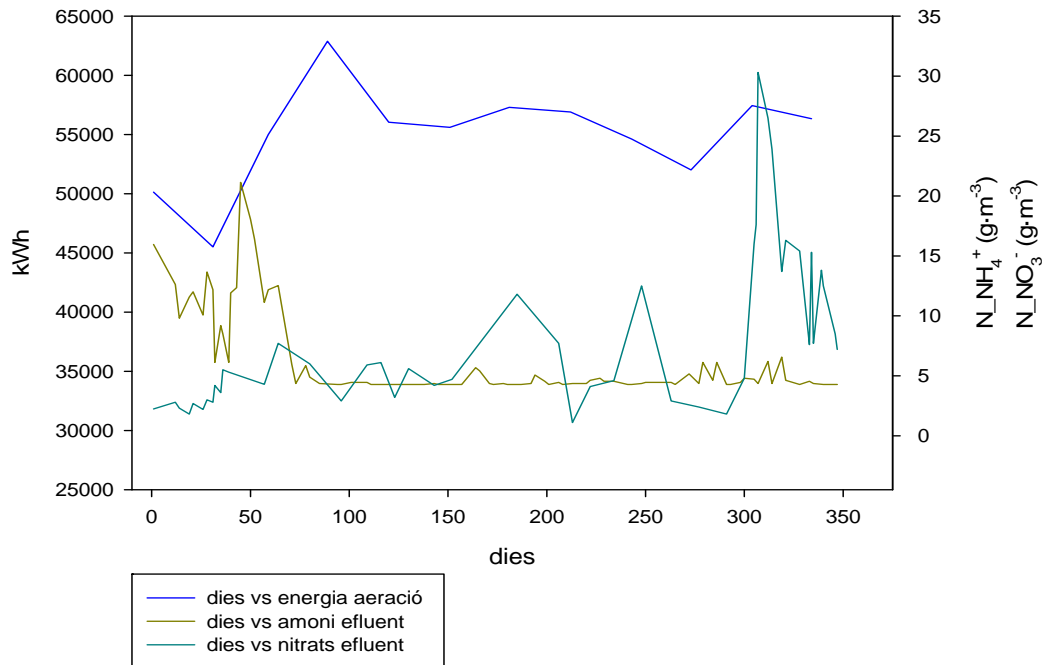


Figura 4.23: Variació del consum energètic i les concentracions d'amoni i nitrats en l'efluent. Open-Loop.

### 4.3.2. AVALUACIÓ DE LES DIFERENTS ESTRATÈGIES DE CONTROL

Una vegada obtingudes les dades comparatives que s'utilitzaran per a l'avaluació de les diferents estratègies proposades, s'efectuen les simulacions corresponents a les diferents estratègies, que pretenen millorar els consums energètics de l'EDAR tot mantenint els nivells de nitrogen dins dels límits establerts.

#### 4.3.2.1. ESTRATÈGIA DE CONTROL OD EN EL REACTOR ASU-4

Es fa un control basat en els punts de consigna d'OD en el reactor ASU-4. Els valors de les concentracions d'OD (variable controlada) són contrastats amb els valors de l'arbre

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

de decisió i el control té acció sobre la variable manipulada (en aquest cas el nombre de rotors en funcionament i les seves velocitats). L'arbre de decisió per aquesta estratègia correspon a la figura 4.24 mentre que la representació d'aquest sistema de control en la plataforma West® es mostra a la figura 4.25. La utilització d'aquest sistema de control basat en regles, no comportaria modificacions importants en el sistema d'aeració de la planta.

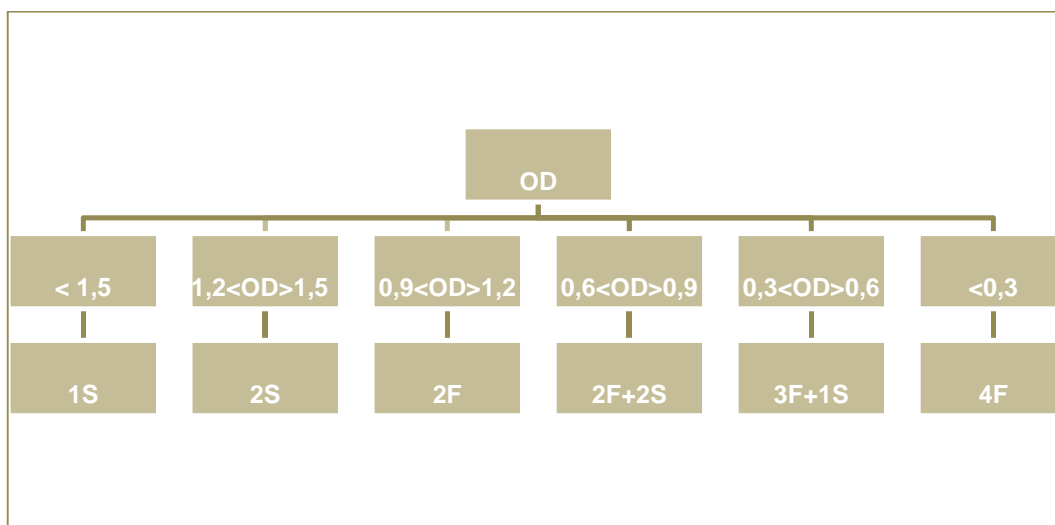


Figura 4.24: Arbre de decisió corresponent a l'estratègia de control de l'OD.

- S= velocitat lenta del motor (43 rpm) i F= velocitat ràpida del motor (57 rpm).
- La numeració que acompanya a aquestes expressions correspon al nombre de motors en funcionament.

1S: correspon a 1 motor funcionant a velocitat lenta.

2S: correspon a 2 motors funcionant a velocitat lenta.

2F: correspon a 2 motors funcionant a velocitat ràpida.

2F+2S : correspon a 2 motors treballant a velocitat ràpida i 2 a velocitat lenta.

3F+1S: correspon a 3 motors treballant a velocitat ràpida i 1 a velocitat lenta.

4F: correspon a 4 motors treballant a velocitat ràpida.



## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

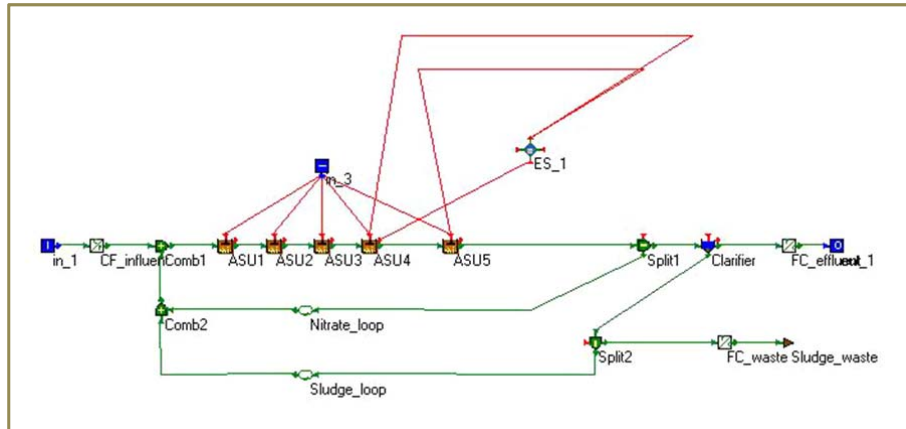


Figura 4.25: Representació de l'estratègia de control OD-ASU-4 . Programa West®.

Les comparatives entre els resultats obtinguts per aquesta estratègia i el sistema operatiu actual de l'EDAR es mostren a la taula 4.22 i la taula de valors calculats pel model ha estat inclosa a l'apèndix.

Taula 4.22: Comparació de resultats per a les estratègies *open-loop* i l'estratègia de control d'OD.

SIMULACIÓ DINÀMICA .		OPENLOOP	DO-CONTROL
TERMES D'ACOMPLIMENT AMBIENTAL	IQE (kg contaminant·d <sup>-1</sup> )	979	954
	N total (nombre de vegades que s'ha superat el límit)	8	6
	N total (% sobre el temps avaluat que es mantenen aquests valors fora de límit)	15,3	7,9
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (nombre de vegades que s'ha superat el límit)	23	18
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (% del temps avaluat que es mantenen aquests valors fora de límit)	32,6	14,4
	Probabilitat d'incompliment (%)	51,2	18,4
TERMES D'AVALUACIÓ ECONÒMICA	Producció de fangs (kg·d <sup>-1</sup> )	1162	1136
	Energia de bombament (kW·h·d <sup>-1</sup> )	139	139
	Energia d'aeració (kW·h·d <sup>-1</sup> )	1173	768
	Energia de mescla (kW·h·d <sup>-1</sup> )	404	404
	Índex OCI	7389	6863



## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

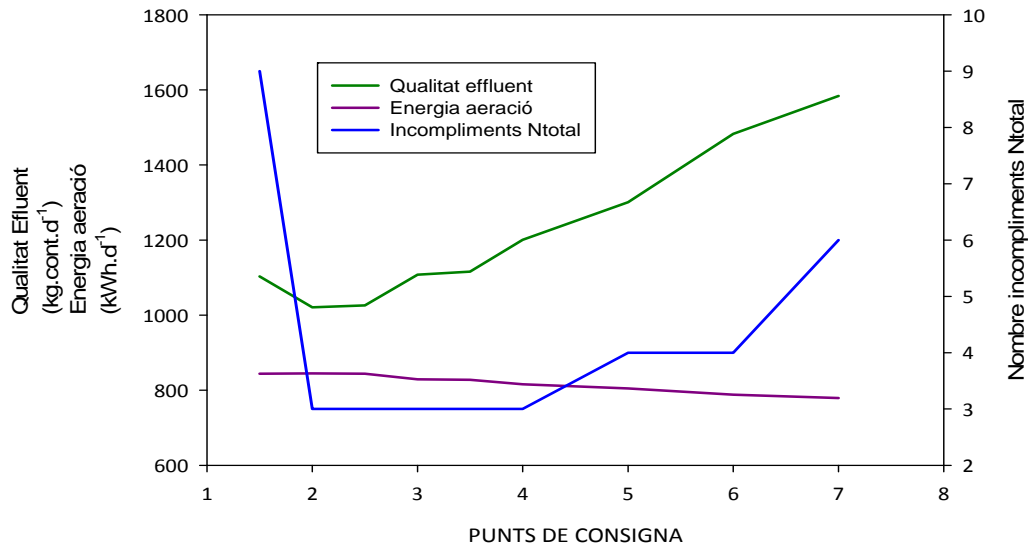


Figura 4.27: OD\_NH\_NO control en el efluent per a diferents punts consigna d'amoni.

La representació dels resultats obtinguts incorporats a la figura 4.27 mostren que l'interval de punts de consigna que presenten més bona qualitat de l'efluent amb menys nombre d'incompliments legislatius per l'N total i menys consum d'energia d'aeració són els compresos entre 1-2,1-3,2,3 i 2,4.

On:

- SP-B-NH 1 *Set point* baix d'amoni igual a 1
- SP-A-NH 2 *Set point* alt d'amoni igual a 2
- SP-B-NH 1 *Set point* baix d'amoni igual a 1
- SP-A-NH 3 *Set point* alt d'amoni igual a 3
- SP-B-NH 2 *Set point* baix d'amoni igual a 2
- SP-A-NH 3 *Set point* alt d'amoni igual a 3
- SP-B-NH 2 *Set point* baix d'amoni igual a 2
- SP-A-NH 4 *Set point* alt d'amoni igual a 4
- SP-B-NH 2 *Set point* baix d'amoni igual a 2
- SP-A-NH 5 *Set point* alt d'amoni igual a 5
- SP-B-NH 3 *Set point* baix d'amoni igual a 3
- SP-A-NH 5 *Set point* alt d'amoni igual a 5
- SP-B-NH 4 *Set point* baix d'amoni igual a 4
- SP-A-NH 6 *Set point* alt d'amoni igual a 6
- SP-B-NH 4 *Set point* baix d'amoni igual a 4
- SP-A-NH 8 *Set point* alt d'amoni igual a 8
- SP-B-NH 5 *Set point* baix d'amoni igual a 5
- SP-A-NH 9 *Set point* alt d'amoni igual a 9

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.23: Simulacions control OD-NH-NO per a diferents *set points* d'amoni.

	<i>OPEN- LOOP</i>	SP-B-NH 1 SP-A-NH 2	SP-B-NH 1 SP-A-NH 3	SP-B-NH 2 SP-A-NH 3	SP-B-NH 2 SP-A-NH 4	SP-B-NH 2 SP-A-NH 5	SP-B-NH 3 SP-A-NH 5	SP-B-NH 4 SP-A-NH 6	SP-B-NH 4 SP-A-NH 8	SP-B-NH 5 SP-A-NH 9
<b>QUALITAT EFLUENT (kg cont·d<sup>-1</sup>)</b>	978	1103	1021	1026	1108	1116	1201	1301	1483	1584
<b>PRODUCCIÓ DE FANGS (kg·d<sup>-1</sup>)</b>	1161	1140	1159	1159	1159	1159	1159	1158	1158	1158
<b>ENERGIA AERACIÓ (kW·h·d<sup>-1</sup>)</b>	1173	844	845	844	829	828	816	805	788	779
<b>ENERGIA DE MESCLA (kW·h·d<sup>-1</sup>)</b>	404	471	460	462	458	460	453	449	439	437
<b>ÍNDEX COSTOS OPERACIONALS</b>	7388	6963	7054	7053	7037	7037	7024	7012	6992	6982
<b>N total (nombre de vegades que s'ha superat el límit)</b>	8	9	3	3	3	3	3	4	4	6
<b>NH<sup>4+</sup> (nombre de vegades que s'ha superat el límit)</b>	23	13	20	20	65	72	23	2	2	1

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Els valors més acceptables per als punts de consigna d'amoni segons els resultats obtinguts amb es trobarien compresos entre SP-B-NH 1 / SP-A-NH 2 i SP-B-NH3/ SP-A-NH 5. Una vegada ajustats els valors dels punts de consigna de l'amoni, es realitza una simulació per a les estratègies de control següents, utilitzant el mòdul inspector que facilitarà el càlcul de la probabilitat d'incompliment legislatiu per als diferents punts de consigna ajustats. Els resultats s'acompanyen també amb el percentatge d'estalvi que s'assoliria en el cas de treballar amb aquests tipus de control. La figura 4.28 mostra l'arbre de control per a aquesta estratègia.

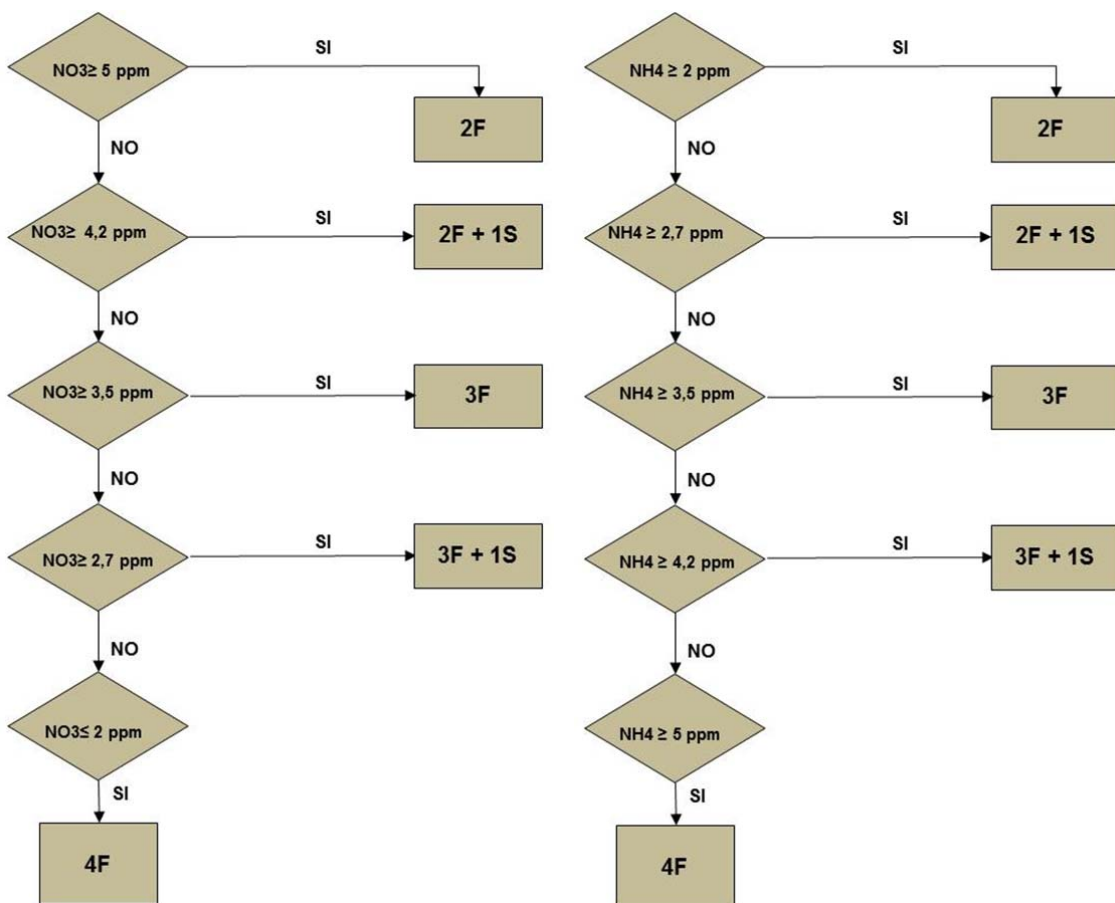


Figura 4.28: Arbre de control per a nitrats i amoni.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.24: Resultats de les simulacions DO-NH-NO control efluent.

	<b>OPEN- LOOP</b>	<b>SP-B-NH 1 SP-A-NH 2</b>	<b>SP-B-NH 1 SP-A-NH 3</b>	<b>SP-B-NH 2 SP-A-NH 3</b>	<b>SP-B-NH 2 SP-A-NH 4</b>	<b>SP-B-NH 2 SP-A-NH 5</b>
<b>QUALITAT EFLUENT (kg cont·d<sup>-1</sup>)</b>	987	877	878	877	878	877
<b>PRODUCCIÓ DE FANGS (kg·d<sup>-1</sup>)</b>	1161	1103	1021	1026	1108	1116
<b>ENERGIA AERACIÓ (kW·h·d<sup>-1</sup>)</b>	1173	772 (34% estalvi)	771 (34% estalvi)	772 (34% estalvi)	771 (34% estalvi)	772 (34% estalvi)
<b>ENERGIA DE MESCLA (kW·h·d<sup>-1</sup>)</b>	404	534	535	534	535	534
<b>ÍNDEX COSTOS OPERACIONALS</b>	7388	6050	6049	6050	6049	6050
<b>N total (nombre de vegades en que s'ha superat el límit)</b>	8	1	1	1	1	1
<b>MÒDUL INSPECTOR Probabilitat d'incompliment (%)</b>	51,2	0	0	0	0	0

Els resultats obtinguts no presenten gaire diferència entre ells ja que es troben dins del marge de *set points* seleccionats que donen una mateixa resposta (veure figura 4.27). S'observa però una millora tant en termes de compliment legislatiu com d'avaluació econòmica respecte al sistema de treball actual de la planta

Per tal de veure si és possible una millora dels resultats, s'elabora una estratègia basada en el mateix sistema de control però amb mesures d'amoní i nitrats en el reactor biològic a fi de donar més temps de resposta al controlador i assolir més bons rendiments en els corresponents termes d'avaluació.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

### 4.3.2.3. ESTRATÈGIA DE CONTROL. OD\_NH\_NO SENSOR EN EL REACTOR BIOLÒGIC

Tal com s'ha comentat, aquesta estratègia està basada en el control d'OD en la zona aeròbia del reactor biològic en funció de les concentracions d'  $\text{NH}_4^+$  i  $\text{NO}_3^-$  mesurades mitjançant un sensor ubicat a la zona aeròbia (ASU-5). S'efectuen simulacions amb influent dinàmic *Benchmark BSM1\_LT* i els resultats són adjuntats a la taula 4.25 essent la representació de l'estratègia en la plataforma West® la corresponent a la figura 4.29.

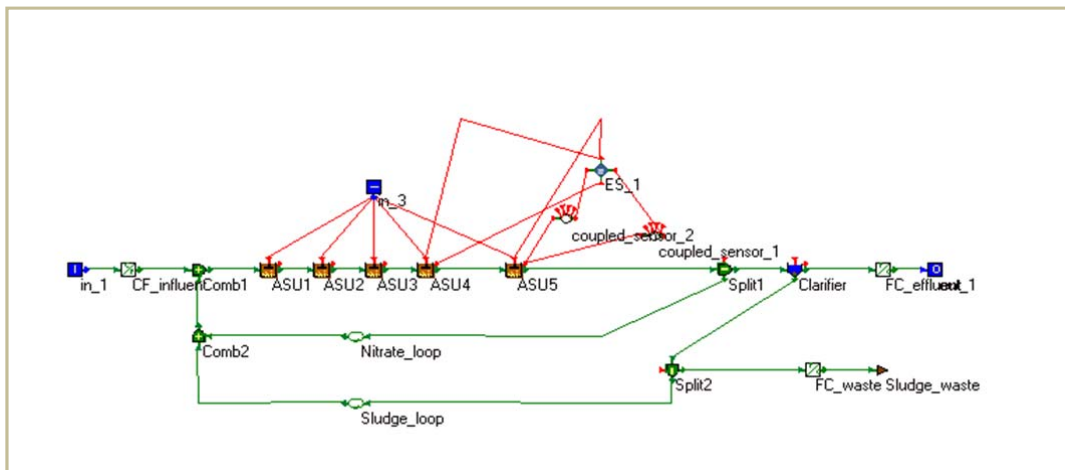


Figura 4.29: Representació de l'estratègia de control OD-NH-NO sensors en el biològic. Programa West®.

Dels resultats obtinguts i presentats a la taula 4.25, s'observa que per a totes les combinacions dels punts de consigna, presenten poques variacions en els valors dels paràmetres d'avaluació. Però comparativament amb l'estratègia OD\_NH\_NO sensor en el efluent i degut a que el temps de resposta del controlador ha augmentat lleugerament, es pot detectar una millora en els termes d'avaluació ambiental i d'estalvi energètic de l'aeració que ha passat d'un 34 a un 39%.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.25: Resultats de les simulacions OD\_NH\_NO control a biològic.

	<b>OPEN- LOOP</b>	<b>SP-B-NH 1 SP-A-NH 2</b>	<b>SP-B-NH 1 SP-A-NH 3</b>	<b>SP-B-NH 2 SP-A-NH 3</b>	<b>SP-B-NH 2 SP-A-NH 4</b>	<b>SP-B-NH 2 SP-A-NH 5</b>
<b>QUALITAT EFLUENT (kg cont·d<sup>-1</sup>)</b>	987	823	824	823	824	823
<b>PRODUCCIÓ DE FANGS (kg·d<sup>-1</sup>)</b>	1161	1136	1136	1136	1136	1136
<b>ENEREGIA AERACIÓ (kW·h·d<sup>-1</sup>)</b>	1173	716 (39% estalvi)	715 (39% estalvi)	716 (39% estalvi)	715 (39% estalvi)	716 (39% estalvi)
<b>ENERGIA DE MESCLA (kW·h·d<sup>-1</sup>)</b>	404	496	496	496	496	496
<b>ÍNDEX COSTOS OPERACIONALS</b>	7388	5993	5992	5992	5992	5992
<b>N total (nombre de vegades que s'ha superat el límit)</b>	8	1	1	1	1	1
<b>MÒDUL INSPECTOR Probabilitat d'incompliment (%)</b>	51,2	0	0	0	0	0

### 4.3.2.4. ESTRATEGIA DE CONTROL PI EN CASCADA

A fi d'aconseguir una millora de l'estratègia anterior es comprova el comportament de la planta utilitzant un control basat en un sistema proporcional integral que controla l'OD en els dos reactors aerobis ASU-4 i ASU-5. En funció de la concentració d'amoni detectada, el sistema de control compara aquest valor amb el *set-point* corresponent actuant sobre la concentració d'oxigen. En aquest cas les aportacions d'oxigen es poden realitzar de manera continuada utilitzant variadors de freqüència que permeten una regulació més acurada sobre la velocitat dels rotors i per tant sobre la regulació de l'OD.

La figura 4.30 correspon a la representació gràfica d'aquest sistema de control.



## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

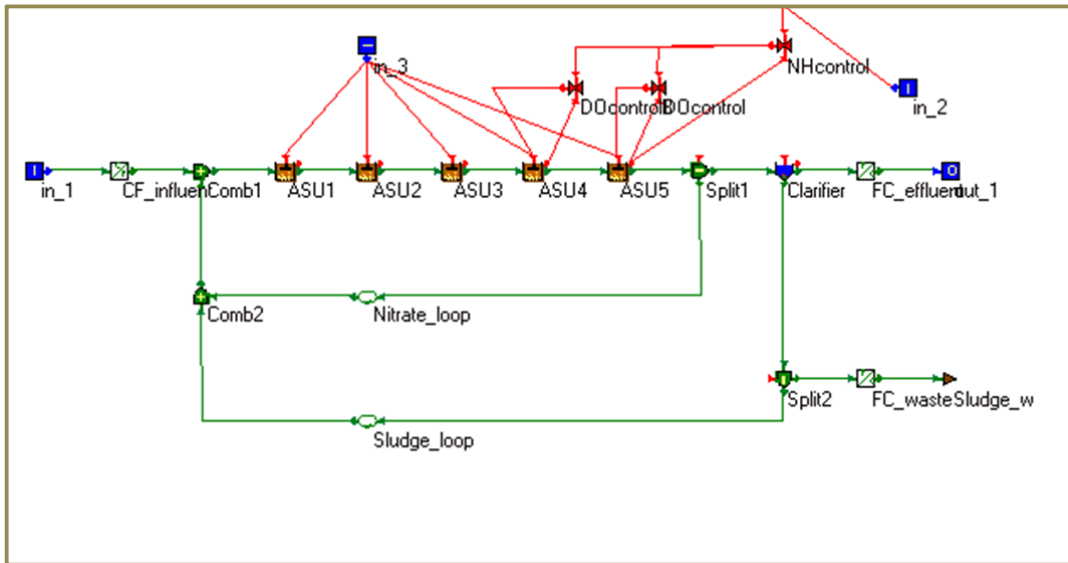


Figura 4.30: Representació de l'estratègia de control PI. Programa West®.

Els punts de consigna donats com a concentració màxima d'amoni en l'efluent són els corresponents als utilitzats per al sistema control OD\_NH\_NO en el efluent.

On.

- SP\_NH 2    *Set point* d'amoni igual a 2
- SP\_NH 2,5    *Set point* d'amoni igual a 2,5
- SP\_NH 3    *Set point* d'amoni igual a 3
- SP\_NH 3,5    *Set point* d'amoni igual a 3,5
- SP\_NH 4    *Set point* d'amoni igual a 4
- SP\_NH 4,5    *Set point* d'amoni igual a 4,5
- SP\_NH 5    *Set point* d'amoni igual a 5
- SP\_NH 5,5    *Set point* d'amoni igual a 5,5
- SP\_NH 6    *Set point* d'amoni igual a 6
- SP\_NH 6,5    *Set point* d'amoni igual a 6,5

Els resultats obtinguts de la simulació per aquesta estratègia es mostren a la taula 4.26. Dels resultats de les simulacions se'n desprèn que, a mesura que els *set points* d'amoni s'incrementen, augmenta el percentatge d'estalvi però el mòdul inspector detecta un increment en la probabilitat d'incompliment. Si es comparen els percentatges d'estalvi obtinguts en el sistema control OD\_NH\_NO en el biològic, aquests no són superats pel PI. Per tal d'aconseguir un nivell d'estalvi més elevat, es desenvolupa una nova estratègia basada en la utilització d'un PI capaç d'adaptar en continu els valors dels *set points* d'amoni segons el sistema tarifari aplicat a l'EDAR.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.26: Resultats de les simulacions control PI en cascada per a diferents *set-points* d'amoní.

	<i>OPEN-LOOP</i>	SP_NH 2	SP_NH 2,5	SP_NH 3	SP_NH 3,5	SP_NH 4	SP_NH 4,5	SP_NH 5	SP_NH 5,5	SP_NH 6	SP_NH 6,5
<b>QUALITAT EFLUENT (kg cont·d<sup>-1</sup>)</b>	987	844	895	949	1005	1062	1120	1181	1181	1297	1356
<b>PRODUCCIÓ DE FANGS (kg·d<sup>-1</sup>)</b>	1161	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1143	1143	1160	1160
<b>ENEREGIA AERACIÓ (kW·h·d<sup>-1</sup>)</b>	1173	872 (25% estalvi)	848 (27% estalvi)	832 (29% estalvi)	820 (30% estalvi)	811 (31% estalvi)	803 (31,5% estalvi)	787 (33% estalvi)	787 (33% estalvi)	785 (33% estalvi)	780 (33,5% estalvi)
<b>EN. DE MESCLA (kW·h·d<sup>-1</sup>)</b>	404	435	437	438	440	442	444	445	445	450	453
<b>ÍNDEX COSTOS OPERACIONALS</b>	7388	7089	7066	7050	7038	7028	7020	6920	6920	7001	6995
<b>N total (nombre de vegades que s'ha superat el límit)</b>	8	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (nombre de vegades que s'ha superat el límit)</b>	23	0	0	1	2	2	1	1	1	1	1
<b>MÒDUL INSPECTOR Probabilitat (%) d'incompliment</b>	51,2	3,3	2,7	2,1	2	2	1,9	2,3	2,2	2,3	2,8

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

### 4.3.2.4.1. ESTRATEGIA DE CONTROL PI EN CASCADA RELACIONAT AMB EL SISTEMA TARIFARI DE L'EDAR

Per aquesta estratègia s'ha relacionat els diferents punts de consigna amb els diferents períodes tarifaris que s'apliquen a l'EDAR així com les diferents classificacions de temporada alta, mitja o baixa, segons els mesos, i la distribució d'hores punta, pla o vall estipulades. Aquestes dades es troben resumides a la taula 4.27.

Taula 4.27: Relació de períodes tarifaris utilitzats a l'EDAR durant l'any 2009.

<b>Gener</b>		<b>Mes de temporada Alta (Tipus A)</b>		
<b>Període tarifari</b>	<b>kWh total per mes</b>	<b>Euros/kWh</b>	<b>Horaris corresponents</b>	<b>% d'utilització tarifa</b>
<b>P-1</b>	16179	0,117241	De 18 a 22 Punta	17,7
<b>P-2</b>	27836	0,106537	De 8 a 18	30,5
<b>P-6</b>	47153	0,084506	De 22-24 Pla De 0 a 8 Vall	51,7
<b>Febrer</b>		<b>Mes de temporada alta (Tipus A)</b>		
<b>P-1</b>	15285	0,117241	De 18 a 22 Punta	18,5
<b>P-2</b>	26719	0,106537	De 8 a 18	32,3
<b>P-6</b>	40748	0,084506	De 22-24 Pla De 0 a 8 Vall	49,2
<b>Març</b>		<b>Mes temporada mitja (Tipus B1)</b>		
<b>P-3</b>	17229	0,113059	De 9 a 15 Punta	17,2
<b>P-4</b>	31946	0,106157	De 8 a 9	31,9
<b>P-6</b>	50824	0,084506	De 15 a 24 Pla De 0 a 8 Vall	50,8
<b>Abril</b>		<b>Mes temporada baixa (Tipus C)</b>		
<b>p-5</b>	58628	0,10325	De 8 a 24 Pla	51,3
<b>p-6</b>	55692	0,084506	De 0 a 8 Vall	48,7
<b>Maig</b>		<b>Mes temporada baixa (Tipus C)</b>		
<b>p-5</b>	47433	0,10325	De 8 a 24 Pla	46,6
<b>p-6</b>	54445	0,084506	De 0 a 8 Vall	53,4
<b>Juny</b>		<b>1ª quinzena temporada mitja (B) 2ª quinzena temporada alta (A1)</b>		
<b>p-1</b>	13067	0,117241	De 16a 22Punta (2ª)	12,9
<b>p-2</b>	13057	0,106537	De 8 a 16 De 22 a 24 Pla (2ª)	12,9
<b>p-3</b>	10340	0,113059	De 9 a 15 Punta (1ª)	10,2
<b>p-4</b>	15302	0,106157	De 8 a 9 De 15 a 24 Pla (1ª)	15,1
<b>p-6</b>	49345	0,084506	De 0 a 8 Vall (1ª i 2ª)	48,8
<b>Juliol</b>		<b>Mes Temporada Alta (Tipus A1)</b>		
<b>p-1</b>	26263	0,117241	De 16 a 22Punta	25,2
<b>p-2</b>	27081	0,106537	De 8 a 16 De 22 a 24 Pla	26,0
<b>p-6</b>	50822	0,084506	De 0 a 8 Vall	48,8

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Agost	Mes temporada Baixa ( Tipus D)			
p-6	103468	0,084506	De 0 a 24 Vall	100
<b>Setembre</b>	<b>Mes temporada mitja (tipus B)</b>			
p-3	19287	0,113059	De 9 a 15 Punta	19,4
p-4	29999	0,106157	De 8 a 9	30,2
			De 15 a 24 Pla	
p-6	50008	0,084506	De 0 a 8 Vall	50,4
<b>Octubre</b>	<b>Mes temporada Baixa (Tipus B)</b>			
p-5	42282	0,10325	De 8 a 24 Pla	44,7
p-6	52293	0,084506	De 0 a 8 Vall	55,3
<b>Novembre</b>	<b>Mes temporada mitja (Tipus B1)</b>			
p-3	18259	0,113059	De 9 a 15 Punta	17,5
p-4	33986	0,106157	De 8 a 9	32,5
			De 15 a 24 Pla	
p-6	52189	0,084506	De 0 a 8 Vall	50,0
<b>Desembre</b>	<b>Mes temporada alta (Tipus A)</b>			
p-1	18611	0,117241	De 16 a 22 (Punta	18,2
P-2	31033	0,106537	De 8 a 16	30,3
			De 22 a 24 Pla	
p-6	52776	0,084506	De 0 a 8 Vall	51,5

Mes	Combinació de períodes tarifaris
gener, febrer, juliol i desembre	P1-P2-P6 temporades altes
març, setembre i novembre	P3-P4-P6 temporada mitja
abril, maig i octubre	P5-P6 temporada baixa
agost	P-6 temporada baixa especial
juny	P1-P2-P3-P4-P6 temporada mitja/alta

No s'han considerat els dies festius en què es treballa amb tarifa P-6 (24 hores vall).

La distribució de punts de consigna segons aquesta relació tarifaria de l'energia consumida són els que figuren a la taula 4.19. Aquesta estratègia està basada en l'adaptació en continu dels valors de consigna d'amoní, més permissius en períodes horaris en què el cost de l'energia és més cara, mentre que aquests valors de consigna es tornen més estrictes en períodes en què el cost de l'energia és menys elevat. La relació de valors de *set-points* aplicats a aquest sistema de control es mostren a la taula 4.28, que conté les diferents combinacions experimentals utilitzades en funció de la catalogació d'hores punta, pla i vall. Així doncs, s'han introduït juntament amb l'influent la relació distribuïda al llarg de l'any, segons mesos i tarifes de la taula 4.27, les diferents combinacions de valors experimentals sobre els *set-points* per tal d'avaluar la resposta que dona el model a cadascun d'ells.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.28: Relació de la variació continuada dels diferents valors de *set points* segons període tarifari.

COMBINACIÓ (1)						
TIPOLOGIA	SP_A_NH	SP_B_NH	SP_A_NO	SP_B_NO	SP_A_OD	SP_B_OD
<b>HORES</b>						
Vall	1	2	5	2	3	1
Pla	2	2	5	2	3	1
Punta	4	2	5	2	3	1
COMBINACIÓ (2)						
Vall	1,5	2	5	2	3	1
Pla	2,5	2	5	2	3	1
Punta	4,5	2	5	2	3	1
COMBINACIÓ (3)						
Vall	2	2	5	2	3	1
Pla	3	2	5	2	3	1
Punta	5	2	5	2	3	1
COMBINACIÓ (4)						
Vall	2,5	2	5	2	3	1
Pla	3,5	2	5	2	3	1
Punta	5,5	2	5	2	3	1
COMBINACIÓ (5)						
Vall	3	2	5	2	3	1
Pla	4	2	5	2	3	1
Punta	6	2	5	2	3	1
COMBINACIÓ (6)						
Vall	3,5	2	5	2	3	1
Pla	4,5	2	5	2	3	1
Punta	6,5	2	5	2	3	1
COMBINACIÓ (7)						
Vall	4	2	5	2	3	1
Pla	5	2	5	2	3	1
Punta	7	2	5	2	3	1
COMBINACIÓ (8)						
Vall	4,5	2	5	2	3	1
Pla	5,5	2	5	2	3	1
Punta	7,5	2	5	2	3	1
COMBINACIÓ (9)						
Vall	5	2	5	2	3	1
Pla	6	2	5	2	3	1
Punta	8	2	5	2	3	1

Les diferents combinacions per aquesta estratègia d' (1) a (9) esdevenen cada vegada més permissives respecte dels *set-points* màxims d'amoni, això comporta un consum inferior d'oxigen a la nitrificació, i per tant, un estalvi energètic en l'aportació d'oxigen, tal com es pot observar a la taula 4.29 on es presenten les diferències de consum de l'energia d'aeració per a cadascuna d'elles, essent més elevat l'estalvi per a la combinació (9).

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.29: Resultats simulacions dels controls PI amb *set-points* de variació continuada segons sistema tarifari.

	OPENLOOP	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
QUALITAT EFLUENT (kg cont·d <sup>-1</sup> )	987	630	672	718	766	815	864	914	965	1016
PRODUCCIÓ DE FANGS (kg·d <sup>-1</sup> )	1161	1136	1139	1139	1139	1139	1139	1139	1140	1140
ENEREGIA AERACIÓ (kW·h·d <sup>-1</sup> )	1173	750 (36% estalvi)	720 (38,6% estalvi)	704 (40% estalvi)	692 (41% estalvi)	683 (41,7% estalvi)	676 (42% estalvi)	670 (42,8% estalvi)	665 (43,3% estalvi)	661 (43,6% estalvi)
ENERGIA DE MESCLA (kW·h·d <sup>-1</sup> )	404	476	478	483	486	491	493	498	502	504
ÍNDEX COSTOS OPERACIONALS	7388	6037	6009	5994	5982	5973	5966	5960	5955	5950
N total (nombre de vegades que s'ha superat el límit)	8	3	3	4	3	3	3	2	2	2
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (nombre de vegades que s'ha superat el límit)	23	0	0	1	1	2	4	11	1	1
MÒDUL INSPECTOR Probabilitat d'incompliment (%)	51,2	0,9	0,7	0,7	0,7	2	0,6	0,7	0,7	0,7

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Els resultats de les simulacions per a aquesta nova modalitat de control es troben inclosos a la taula 4.29, on es pot observar una millora en l'estalvi energètic de l'aeració respecte dels altres sistemes, essent en tots els casos la probabilitat d'incompliment legislatiu relativament baixa.

A la figura 4.31 es pot observar el comportament d'aquest sistema de control, l'adaptació dels *set-points* respecte del sistema tarifari i la concentració d'amoni en el efluent resultant, per un període corresponent als 9 primers dies del mes de gener amb la seva distribució d'hores punta, pla i vall.

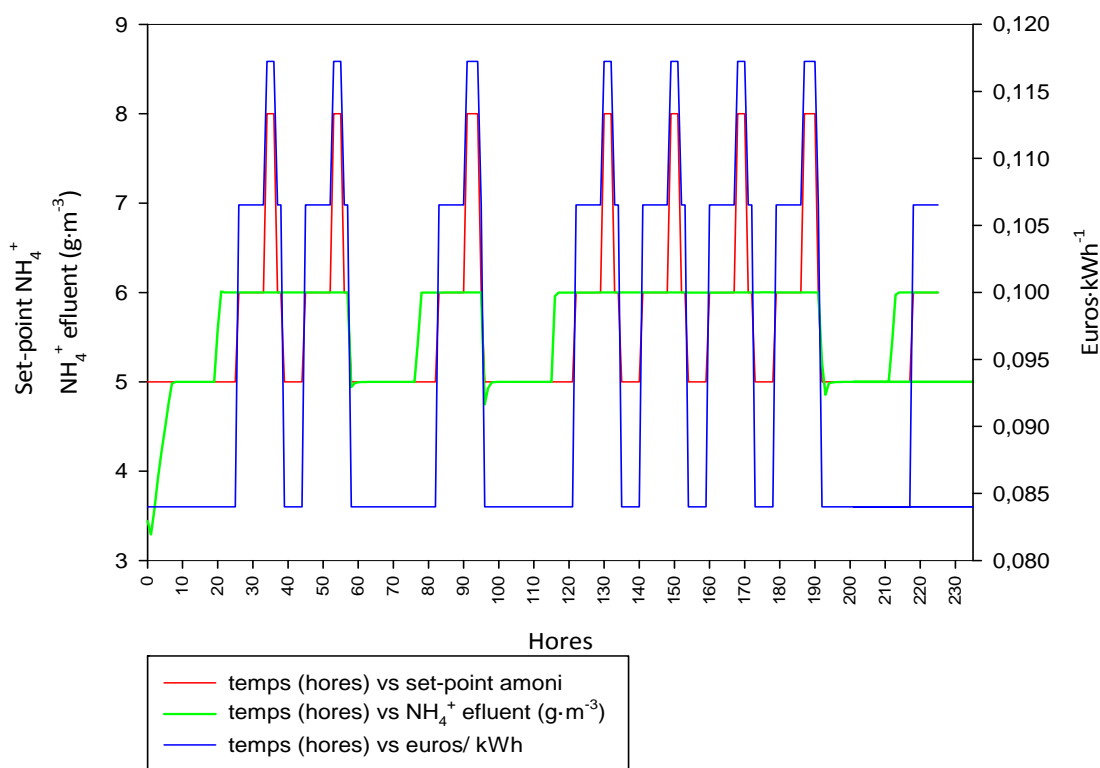


Figura 4.31: Comportament del sistema de control per a l'estratègia PI amb adaptació en continu dels *set-points* en funció dels sistema tarifari.

A mesura que s'incrementen les tarifes els *set points* d'amoni esdevenen més permissius (en aquest cas  $8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  per hores punta) i més estrictes quan les tarifes són més baixes ( $6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  per hores pla i  $5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  per hores vall). Les concentracions d'amoni en l' efluent segueixen la mateixa dinàmica, mantenint-se en valors de 5 i  $6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

La evolució de les estratègies aplicades a l'EDAR de la Vall del Ges per tal d'assolir els objectius es resumeix a la figura 4.32.

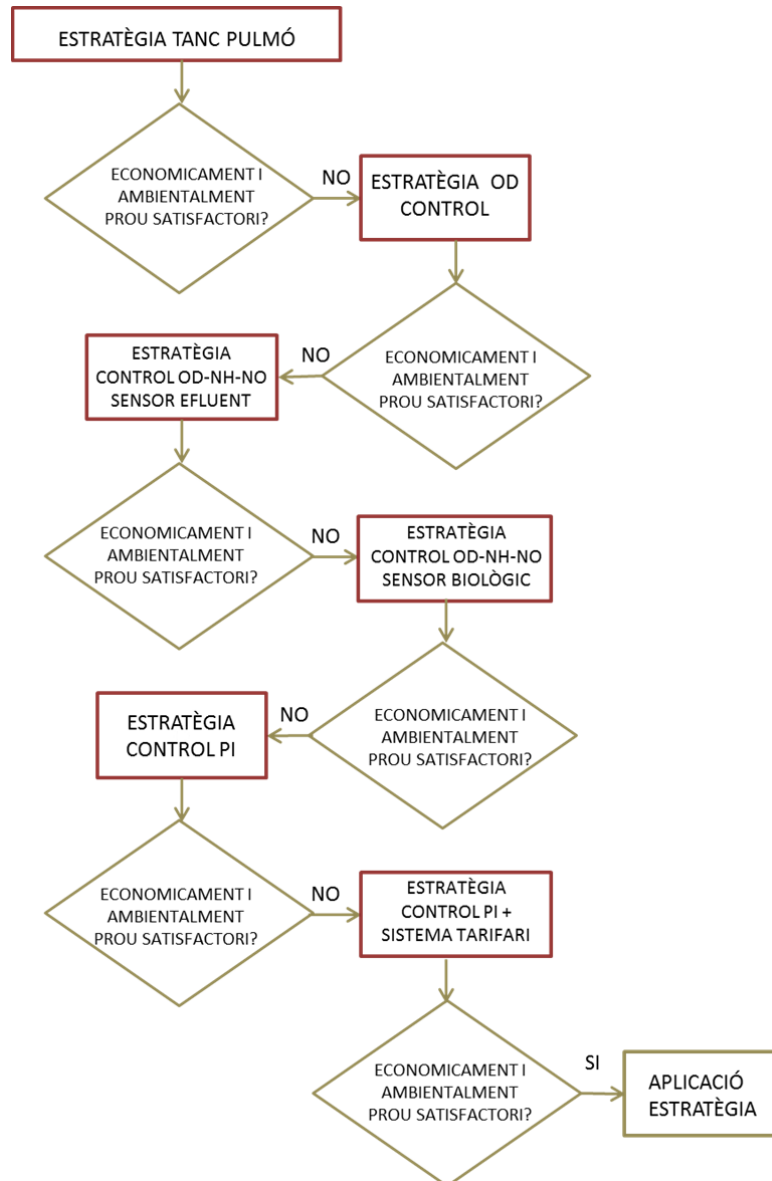


Figura 4.32: Evolució de les estratègies aplicades a l'EDAR de la Vall del Ges.

De l'avaluació de les diferents estratègies estudiades, la que es presenta com a més satisfactòria des del punt de vista ambiental i econòmic és la que correspon a l'estratègia de control utilitzant un controlador PI capaç d'adaptar en continu el valor dels *set-points* en funció del sistema tarifari de la planta. La figura 4.33 presenta les



## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

comparatives de costos i de concentració d'amoni en l'efluent entre aquest sistema i el sistema actual de treball de la planta.

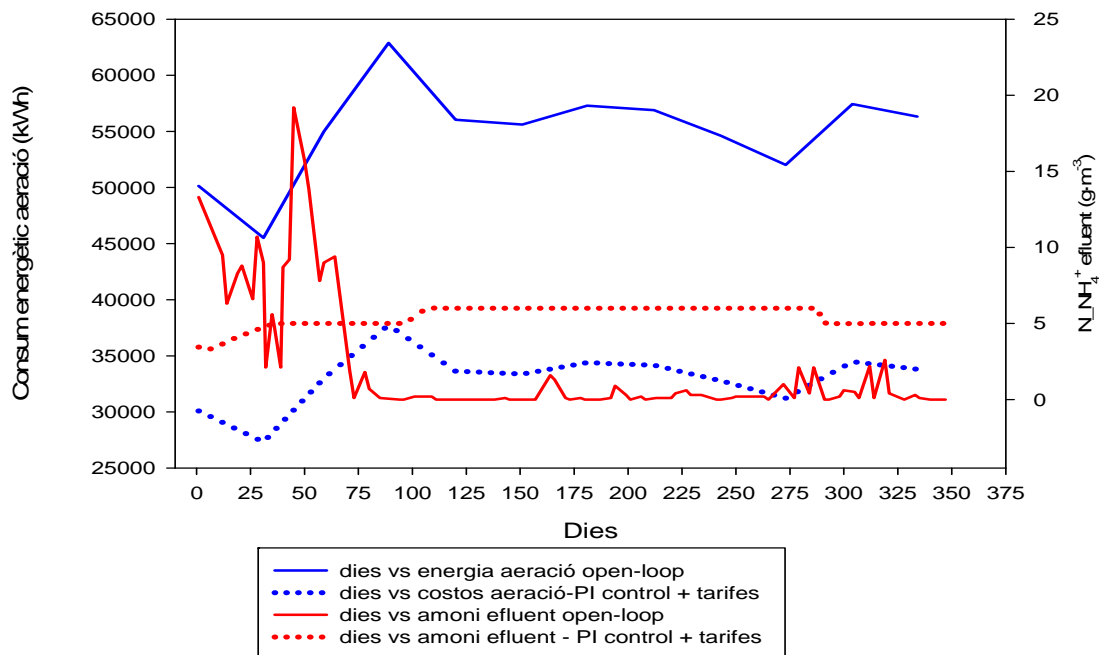


Figura 4.33: Comparativa de costos i concentracions de  $N-NH_4^+$  en l'efluent. Sistema *open-loop* i control PI amb adaptació en continu dels *set-points* segons tarifes elèctriques.

Dels valors obtinguts en la seva simulació respecte dels valors presentats en la resta d'estratègies simulades, s'observa que la implementació d'aquesta estratègia en l'EDAR de La Vall del Ges, implicaria un estalvi en els costos energètics de l'aeració d'aproximadament un 40% tot i mantenint uns nivells de qualitat de l'efluent que permetrien assegurar el compliment de la legislació amb un percentatge de seguretat molt elevat (de l'ordre d'un 99,5%).

La implementació d'aquesta estratègia comportaria uns costos associats deguts a l'adquisició de la instrumentació necessària, la programació del PLC i sistemes de control avançat, així com del manteniment dels sensors, tant en mà d'obra (una hora setmanal d'operari) com del propi manteniment dels sensors (calibratge i canvis de membrana). També s'inclou els costos dels variadors de freqüència per als 4 motors que accionen els 8 rotors dels canals aerobis. La taula 4.30 resumeix els costos de instal·lació i manteniment per a aquesta estratègia de control.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.30: Costos estimats d'implementació d'un controlador PI amb sensors de nitrats i amoni.

CAPACITAT DE L'EDAR (m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	COSTOS D'IMPLEMENTACIÓ I MANTENIMENT (€)		COST PER UNITAT DE VOLUM TRACTAT (€·m <sup>-3</sup> )
< 10000	20000 - 50000		2 - 5
10000 - 75000	30000 - 80000		3 - 1
75000 - 1000000	80000 - 250000		1 - 0,25
COSTOS DELS VARIADORS DE FREQUÈNCIA			
REFERÈNCIA	PREU UNITARI	NOMBRE D'UNITATS	COST TOTAL
SIEMENS SINAMICS G120- 37 kW-50HP AMB FILTRE	4960	4	19840

No s'ha comptabilitzat l'IVA corresponent per ésser aquest retornable al cap de l'any d'efectuar la inversió.

En el cas de l'EDAR de la Vall del Ges (capacitat de tractament de 6000 m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>) es podria aplicar uns costos compresos entre 2 i 5 €·m<sup>-3</sup> de cabal de disseny. Considerant el seu cabal màxim de tractament s'hi podria assignar un valor de 3 €·m<sup>-3</sup>. En aquests costos s'hi ha de considerar la compra i la instal·lació de variadors de freqüència pressupostats en un valor aproximat de 5.000 €/u. L'estalvi que suposaria per l'EDAR al llarg de l'any 2009 s'ha calculat en funció dels costos totals anuals destinats a l'aeració aplicant el percentage d'estalvi estimat que s'assoliria en cas de treballar amb aquest sistema de control.

Cost total anual aeració = Cost total anual facturat \* 0,55

163831 € \* 0,55 = 90107€

El cost d'aquesta aeració, una vegada implantat aquest sistema de control, seria de:

90101€ \* (1-0,4) = 54060 €/any amb un estalvi de 36.040 € anuals

El càlcul de la viabilitat de la inversió i del període de retorn queda resumida a la taula 4.31. Aquests càlculs estan basats en un cost total de 30000 € + 19840 € = **49840 €** i considerant que la planta tracta el màxim de la seva capacitat.

## 4. RESULTATS I DISCUSSIÓ

Taula 4.31: Càlcul del VAN i PR per a l'estratègia de control PI amb adaptació en continu dels valors dels *set-points* en funció del sistema tarifari de l'EDAR.

n	0	1	2	3	4
A	<b>35040€</b>				
FC		36042	36042	36042	36042
r	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%
(1+r)^n	1	1,075	1,156	1,242	1,335
1/(1+r)^n	1	0,93	0,86	0,80	0,75
FCd	<b>-75721€</b>	33527	31178	29019	26997

Càlcul del VAN =  $-A + [ FC/(1+r)^1 + FC/(1+r)^2 + FC/(1+r)^3 + \dots + FC/(1+r)^n ]$

A= Import total inversió; FC= Fluxos de caixa en aquest cas estalvi econòmic; r= cost del capital, (es comptabilitza una mitjana del 7,5% al llarg d'un període de retorn estimat en un màxim de 4 anys).

$1/(1+r)^n$  = factor de descompte per aquest tipus d'interès i aquest nombre d'anys FCd = Fluxos de caixa descomptats (estalvi econòmic net)

**VAN = -49840 + (33527+31178+29019+26997)=+ 70881 VAN > 0 INVERSIÓ RECOMANABLE**

Període de retorn (PR)

n	A	FC	Fcac
1	<b>49840€</b>		
2		33527	-16313
3		33527	17214
4		33527	50741

n= nombre d'anys A=inversió inicial FC=Fluxos de caixa anuals Fcac = Fluxos de caixa acumulats al cap de 4 anys= 50741 €

**És ecomanable un PR comprès entre 2 i 4 anys ( PERÍODE DE RETORN DE LA INVERSIÓ D'UN ANY I MIG).**

Comparativament amb l'altra estratègia avaluada econòmicament, aquesta resulta una inversió molt més favorable, amb un VAN positiu entre el primer i segon any amb un període de retorn d'1,5 anys, i un flux de caixa acumulat a partir dels 4 anys de la instal·lació i funcionament de 50741 €.

## CONCLUSIONS

---



## 5. CONCLUSIONS

Del treball realitzat s'han pogut extreure les conclusions següents:

Del calibratge de l'EDAR de La Vall del Ges s'ha obtingut un ajustament que s'ha considerat molt satisfactori respecte a la DQO, DBO5 i TSS . Pel que fa als nitrats l'error absolut es considera satisfactori encara que presenti un error relatiu més gran que aquests paràmetres. Pel que fa a l'amoni encara que l'error relatiu sigui elevat es considera que el procés de calibratge es prou correcte, tenint en compte els valors promig d'aquest paràmetre que es troba prou allunyat dels valors límits que estableix la reglamentació vigent.

La utilització del model calibrat permet realitzar una comparació objectiva de diferents estratègies de control. La selecció d'estratègies per tal assolir els objectius, no pot ésser aplicada indiscriminadament a qualsevol planta. L'estudi, mitjançant simulacions o bé càlcul de les inversions que aquestes comporten, condueixen a la selecció de l'estratègia òptima per a una determinada EDAR.

De les diferents estratègies de control estudiades per a l'EDAR de la Vall del Ges es poden extreure les conclusions següents:

- Per a l'estratègia de la utilització d'un tanc pulmó, s'ha comprovat que aquesta no resulta viable econòmicament per aquesta EDAR tot i que podria presentar-se com una estratègia vàlida en plantes que presentessin cabals de tractament més elevats, o bé que la propia planta disposés d'una capacitat d'emmagatzematge disponible.
- Per a l'estratègia de control d'OD en el reactor biològic s'ha aconseguit un estalvi d'un 34%, però en termes d'acompliment ambiental els resultats no es presenten del tot satisfactoris. En aquest cas caldria un millor ajustament dels *set-points* d'OD tot i que això comportaria un estalvi inferior.
- De les estratègies de control d' $\text{NH}_4^+$  i  $\text{NO}_3^-$  en l'efluent i en el reactor biològic, s'ha comprovat que la ubicació dels sensors en el efluent presenta una resposta més lenta que si es troben ubicats en el mateix reactor biològic, tot i que això comporta un increment dels costos de manteniment dels sensors. Les membranes d'aquests sensors presenten una vida útil més elevada si es están

en contacte amb aigua més neta que si es troben submergits en el biològic i sotmesos a més desgast.

- De l'estratègia d'utilitzar un controlador PI, s'en conclou que aquest sistema presenta una resposta molt més ràpida, però cal invertir en variadors de freqüència i sensors amb la seva corresponent instal·lació i manteniment.
- Utilitzant un sistema de control PI en cascada amb adaptació dels *set-points* de forma continuada segons períodes tarifaris de la planta, s'assoleixen estalvis econòmics en l'aeració d'aproximadament un 40%, amb un període de retorn calculat per la inversió d'1,5 anys.

A partir del model calibrat de l'EDAR de la Vall del Ges ha estat possible dissenyar un sistema de control que permet el manteniment i la millora de la qualitat del seu efluent alhora que reduir els costos energètics de l'aeració, mantenint una probabilitat d'incompliment que es pot considerar molt satisfactòria.

## BIBLIOGRAFIA

---

**A**gència Catalana de l'Aigua. Generalitat de Catalunya. Fitxes depuradores en servei. Disponible a: [http://aca\\_web.gencat.cat/aca/depuradores\\_servei](http://aca_web.gencat.cat/aca/depuradores_servei). Consulta Abril 2013.

Akyurek E, Yuceer M, Atasoy I, Berber R. Comparison of control strategies for dissolved oxygen control in activated sludge wastewater treatment process. Proceedings of 19<sup>th</sup> European Symposium on Computer Aided Process Engineering ESCAPE19.1197-1201, Cracow, Poland (2009).

Alex J, Beteau JF, Coop JB, Hellings C, Jeppsson U, Marsili-Libelli S, Pons MN. Benchmark for evaluating control strategies in wastewater treatment plants. Proceedings of European Control Conference ECC'99. Karlsruhe, Germany (1999).

Anfruns A. Determinació del model hidràulic del reactor biològic de l'EDAR Vall del Ges. Projecte fi de carrera. Universitat de Girona (2006).

Araújo de ACB, Gallani S, Mulas M, Olsson G. Systematic approach to the design of operation and control policies in activated sludge systems. Industrial and Engineering Chemistry Research, **50**, 8542-8557 (2011).

Åström KJ, Wittenmark B. Computer controlled systems. Prentice Hall, 3<sup>ra</sup> edició. Upper Saddle River, N. J. (1997).

Ayasa E, De la Sota A, Grau P, Sagarna JM, Salterain A and Suescun J. Supervisory control strategies for the new WWTP of Galindo-Bilbao: the long run from the conceptual design to the full-scale experimental validation. Water Science and Technology, **53** (4), 193-201 (2006).

**B**alaguer MD, Salgot M, Sánchez M, Turón C, Puig MA. Gestió i tractament d'aigües residuals. Recurs electrònic. Servei de Publicacions de la Universitat de Girona. Girona (2007).

Benedetti L, Bixio D, Claeys F, Vanrolleghem PA. Tools to suport a model-based methodology for emission/immission and benefit/cost/risk analysis of wastewater Systems that considers uncentainty. Environmental Modelling and Software, **23**, 1082-1091 (2008).

Bouzas A, González JA, Martínez-Soria V, Peña-roja JM. Bases de Ingeniería Ambiental. Ed. Universitat de València. Universitat de València (2007).

Burrows LJ, West JR, Forster CF, Martin A. Mixing studies in an Orbal activated sludge System. Water SA, **27**, 79-83 (2001).



Butler D, Schütze M. Integrating simulation models with a view to optimal control of urban wastewater systems. *Environmental Modelling and Software*, **20** (4), 415-426 (2005).

**C**ajsa H. Calibration of a dynamic model for the activated sludge process at Henriksdal wastewater treatment. Thèse doctorale. Department of Information Technology. Uppsala University (2005).

Carrasco EF, Rodríguez J, Puñal A, Roca E, Lem, JM. Diagnosis of acidification states in an anaerobic wastewater treatment plant using a fuzzy-based expert System. *Control Engineering Practice*, **12** (1), 59-64 (2003).

Chen D, Seborg DE. Design of decentralized PI control systems based on Nyquist stability analysis. *Journal of Process Control*, **13**, 27-39 (2003).

Comas J, Meabe E, Sancho L, Ferrero G, Sipma J, Monclús H, Rodríguez-Roda I. Knowledge-based system for automatic MBR control. *Water Science and Technology*, **62** (12), 2829-2836 (2010).

Coop, J.B. *The COST Simulation : description and simulator manual. A product of COST Action 624 and COST Action 682*. Office for Official Publications of the European Community, Luxembourg (2002).

Corominas LL. Control and optimization of an SBR for nitrogen removal: from model calibration to plant operation. Tesi doctoral. Universitat de Girona (2006).

Cristea S, de Prada C, Sarabia D, Gutiérrez G. Aeration control of a wastewater treatment plant using hybrid NMPC. *Computers and Chemical Engineering*, **35**, 638-650 (2011).

Cunha Machado V., Gabriel D, Lafuente J, Baeza JA. Cost and effluent quality controllers design based on the relative gain array for a nutrient removal WWTP. *Water Research*, **43**, 5129-5141 (2009).

De Pauw D. Optimal experimental design for calibration of bioprocess models: a validated software toolbox. PhD Thesis. Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences. Ghent University). Ghent, (Bélgica) (2005).

**D**evesa F, Comas J, Turon C, Freixó A, Carrasco F, Poch M. Scenario analysis for the role of sanitation infrastructures in integrated urban wastewater management. *Environmental Modelling and Software*, **24**, 371-380 (2012).

Drews RJLC, Greeff AM. Nitrogen elimination by rapid alternation of aerobic/anòxic conditions in orbal activated sludge plants. *Water Research*, **7**, 1183-1194 (1973).

Dupont R, Henze M. Modelling of the secondary clarifier combined with the activated sludge model nº 1. *Water Science and Technology*, **25**(6), 285-300 (1992).

**E**gea JA, Vries D, Alonso AA, Banga JR. Global optimisation for integrated design and control of computationally expensive process models. *Industrial and Engineering Chemical*, **46**, 9148-9157 (2007).

EPA. Evaluation of oxidation ditches for nutrient removal. Environmental Protection Agency, Office of Wastewater Enforcement and Compliance. Washington D.C. USA (1992).

**F**errer J, Seco A. Tratamientos biológicos de aguas residuales. Ed. UPV. Universidad Politécnica de Valencia (2003).

Ferrero, G., Monclús, H., Buttiglieri, G., Comas, J., Rodríguez-Roda, I. Automatic control system for energy optimization in membrane bioreactors. *Desalination*, **268** (1-3), 276-280 (2010).

Fiter M, Güell D, Comas J, Colprim J, Poch M, Rodríguez-Roda I. Energy saving in a wastewater treatment process: An application of Fuzzy Logic Control. *Environmental Technology*, **26**(11), 1263-1270 (2005).

Flores-Alsina X, Corominas LI, Vanrolleghem PA. Multi-criteria evaluation of control strategies in WWTP removing organic carbon, nitrogen and phosphorus. International Environmental Modelling and Software Society. International Congress on Environmental Modelling and Software. 5<sup>th</sup> Biennial Meeting. Ottawa, Canada (2010a).

Flores-Alsina X, Gallego A, Feijoo G, Rodríguez-Roda I. Multiple-objective evaluation of wastewater treatment plant control alternatives. *Journal of Environmental Management*, **91**, 1193-1201 (2010b).

**G**ao D, Peng Y, Li B, Liang H. Shortcut nitrification-denitrification by real-time control strategies. *Bioresource Technology*, **100**, 2298-2300 (2009).

Gernaey KV, Flores-Alsina X, Rosen Ch, Benedetti L, Jeppsson U. Dynamic influent pollutant disturbance scenario generation using a phenomenological modelling approach. *Environmental Modelling and Software*, **26**, 1255-1267 (2011).

Gernaey KV, van Loosdrecht MCM, Henze M, Lind M, Jørgensen SB. Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: State of the art. *Environmental Modelling and Software*, **19**(9), 763-783 (2004).

Glynn Henry JI, Heinke GW. Ingeniería ambiental. Prentice- Hall, Méjico (1999).

Grau P. Nueva metodología de modelado matemático integral de las EDAR. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Navarra (2007).

Guerrero J, Guisasola A, Vilanova R, Baeza JA. Improving the performance of a WWTP control system by model-based setpoint optimisation. *Environmental Modelling and Software*, **26** (4), 492- 497 (2010).

**H**auduc H, Rieger L, Ohtsuki T, Saw A, Takács I, Winkler S, Héduit A, Vanrolleghem PA, Guillot S. Activate sludge modelling: development and potential use of a practical applications data base. *Water Science and Technology*, **63**(10), 2164-2182 (2011).

Henze M, Grady CPL, Gujer W, Marais GUR, Matsnot T. Activated sludge Model Nº 1, IAWPRC. Scientific and Technical Report Nº 1. IAWPRC. London (1987).

Henze M, Gujer W, Mino T, van Loosdrecht M. Activated Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment. IWA Publishing. Scientific and Technical Report series (2002).

Hernández-del-Olmo F, Llanes FH, Gaudioso E. An emergent approach for the control of wastewater treatment plants by means of reinforcement learning techniques. *Expert Systems with Applications*, **39**, 2355-2360 (2012).

Holenda B, Domokos E, Rédey Á, Fazakas F. Dissolved oxygen control of the activated sludge wastewater treatment process using model predictive control. *Computers and Chemical Engineering*, **32**, 1270-1278 (2007).

**I**nsel G, Russell D, Beck B, Vanrolleghem PA. Evaluation of nutrient removal performance for an orbital plant using the ASM2d model. Presentation, WEFTEC 2003 Conference, Los Angeles, California, Octubre (11-15) (2003)

**K**andare G, Viúdez-Moreiras D, Hernández-del-Olmo F. Adaptive control of the oxidation ditch reactors in a wastewater treatment plant. *International Journal of Adaptive and Signal Processing* ( DOI: 10.1002) (2012).

Karnavas WJ, Sanchez PJ, Bahill A. Sensitivity analysis of continuous and discrete systems in the time and frequency domains. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, **23**(2), 488-501 (1993).

Koehne M, Hoen K, Schuhen M. Modelling and simulation of final clarifiers in wastewater treatment plants. *Mathematics and Computers in Simulation*, **39**(5-6), 609-616 (1995).

**L**eu Shao-Yuan, Rosso D, Larson L.E. Stenstrom K. Real-time aeration efficiency monitoring in the activated sludge process and methods to reduce energy consumption and operating costs. *Water Environmental Research*, **81** (12), 2471-2481 (2009).

Luyben ML & Luyben WL. *Essentials of Process Control*. Mc-Graw-Hill, 2<sup>th</sup> edition, New York (2002).

**M**arquot A, Stricker AE, Racault I. ASM1 dynamic calibration and long-term validation for an intermittently aerated WWTP. *Water Science and Technology*, **53**(12), 247-256 (2006).

Muñoz C, Rojas D, Candia O, Azocar L, Bornhard C, Antileo C. Supervisory control system to enhance partial nitrification in an activated sludge reactor. *Chemical Engineering Journal*, **145**, 453-460 (2009).

**N**ejjari F, Benhammoun A, Dahhou B, Roux G. Non-linear multivariable adaptive control of an activated sludge wastewater treatment process. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **13**, 347-365 (1999).

Norhaliza A, Wahab A, Katebi R, Balderud J. Multivariable PID control design for activated sludge process with nitrification and denitrification. *Biochemical Engineering Journal*, **45**, 239-248 (2009).

**O**lsson G, Marinus K, Nielsen ZY, Lynggard-Jensen A , Steyer JP. Instrumentation, control and automation in wastewater systems. Scientific and Technical Report nº 15. IWA Publishing (2005).

Olsson G. ICA and me-A subjective review. *Water Research*, **46**, 1585-1624 (20012).

Olsson G. *Water and Energy: Threats and Opportunities*, Chap. 1. IWA Publishing, London (2011).

Otterphol R, Freund M. Dynamic models for clarifiers of activated sludge plants with dry and wet weather flows. *Water Science and Technology*, **26**(5-6), 1391-1400 (1992).

**P**atry GG, Takács I. Settling of flocculent suspensions in secondary clarifiers. *Water Research*, **26**(4), 473-479 (1992).

Pires O, Palma C, Moita I, Costa JC, Alves MM and Ferreira EC. A fuzzy-logic based expert system for diagnosis and control of an integrated wastewater treatment. *Proceedings of 4<sup>th</sup> Mercosur Congress on Process Systems Engineering*. Enpromer. Rio de Janeiro (2005).

Pleau M, Colas H, Lavallee P, Pelletier G, Bonin R. Global optimal real-time control of the Quebec urban drainage System. *Environmental Modelling and Software*, **20**, 401-413 (2005).

Poch M. Les qualitats de l'aigua. Monografies de Medi Ambient. Ed. Departament de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya (1999).

Prat P, Benedetti L, Corominas LI, Comas J, Poch M. Model-based knowledge acquisition in environmental decision support system for wastewater integrated management. *Water Science and Technology*, **65** (6), 1123-1129 (2012).

**R**amalho RS. Tratamiento de Aguas residuales. Reverté, 2ª edición, Barcelona (1996).

Rauch W, Harremoës P. Genetic algorithms in real time control applied to minimize transient pollution from urban wastewater systems. *Water Research*, **33** (5), 1265-1277 (1999).

Rieger L, Gillot S, Langergraber G, Ohtsuki T, Shaw A, Takács I, Winkler S. Guidelines for using activated sludge models. IWA publishing, London UK (2013).

Rodríguez-Roda I, Sánchez-Marrè M, Comas J, Baeza J, Colprim J, Lafuente J, Cortés U and Poch M. A hybrid supervisory system to support WWTP operation: implementation and validation. *Water Science and Technology*, **45** (4-5), 289-297 (2002).

Rosen C, Jeppsson U, Vanrolleghem PA. Towards a common benchmark for long-term process control and monitoring performance evaluation. *Water Science and Technology*, **50**(11), 41-49 (2004).

**S**altelli A, Tarantola S, Campolongo F, Ratto M. Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models. John Wiley and Sons. Nova York (2004).

Saltelli A, Tarantola S, Campolongo F. Sensitivity analysis as an ingredient of modelling. *Statistical Science*, **15**(4), 377-395 (2000).

Seggelke K, Rosenwinke KH, Vanrolleghem PA, Krebs P. Integrated operation of sewer system and WWTP by simulation-based control of the WWTP inflow. *Water Science and Technology*, **52** ( 5), 195-203 (2005).

Shen W, Chen X, Corriou JP. Application of model predictive control to the BSM1 benchmark of wastewater treatment process. *Computers and Chemical Engineering*, **32**, 2849-2856 (2008).

Shilling W, et al. Real-time control of urban drainage Systems. IAWPRC, London (1989).

Smith, LH, Mc Carty, P L, Kitanidis PK. Spreadsheet Method for evaluation of biochemical reaction rate coefficients and their uncertainties by weighed nonlinear least-squares analysis of the integrated Monod equation. *Applied and Environmental Microbiology*, **64**(6), 2044-2050 (1998).

Stare A, Vrečko D, HUala N, Strmčnik S. Comparison of control strategies for nitrogen removal in an activated sludge process in terms of operating costs: A simulation study. *Water Research*, **41**, 2004-2014 (2007).

Stephanopoulos G. *Chemical process control. An introduction to theory and practice.* Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, N.J. (1984).

**T**akács I, Patry GG, Nolasco D. A dynamic model of the clarification-tickening process. *Water Research*, **25**, 1263-1271 (1991).

Tchobanoglous G, et al. *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse.* 4<sup>th</sup> ed., Mc.Graw-Hill Professional. New York (2003).

**V**anrolleghem PA and Gillot S. Robustness and economic measures as control benchmark performance criteria. *Water Science and Technology*, **45** (4-5), 117-126 (2002).

Vanrolleghem PA, Benedetti L, Meirlaen J. Modelling and real-time control of the integrated urban wastewater system. *Environmental Modelling and Software*, **20**, 427-442 (2005).

Vlad C, Sbarciog M, Barbu M, Caraman S, Vande Wouwer A. Indirect control of substrate concentration for a wastewater treatment process by dissolved oxygen tracking. *Journal of Control Engineering and Applied Informatics*, **14** (1), 37-47 (2012).

Vlad C, Sbarciog M, Barbu M. Linear predictive control of a wastewater treatment process. *The annals of "Dunarea de Jos" University of Galati*, **34** (1), 15-20 (2011).

**W**ang X, Peng Y, Ma Y, Wang S. Effects of operational variables on nitrogen removal performances and its control in a pre-denitrification plant. *Chemical Engineering Technology*, **30** (2), 234-241 (2007).

**Z**adeh, LA. Fuzzy sets. *Information and Control Journal*, **8**, 330-353 (1965).

Zaho H, Isaacs SH, SØeberg H and Kümmel M. An analysis of nitrogen removal and control strategies in an alternating activated sludge process. *Water Research*, **2**, 535-544 (1994).

Zubowicz T, Mieczystaw AB, Piotrowski R. Intelligent PI controller and its application to dissolved oxygen tracking problem. *Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems*, 4(3), 16-24 (2010).

## APÈNDIX

---





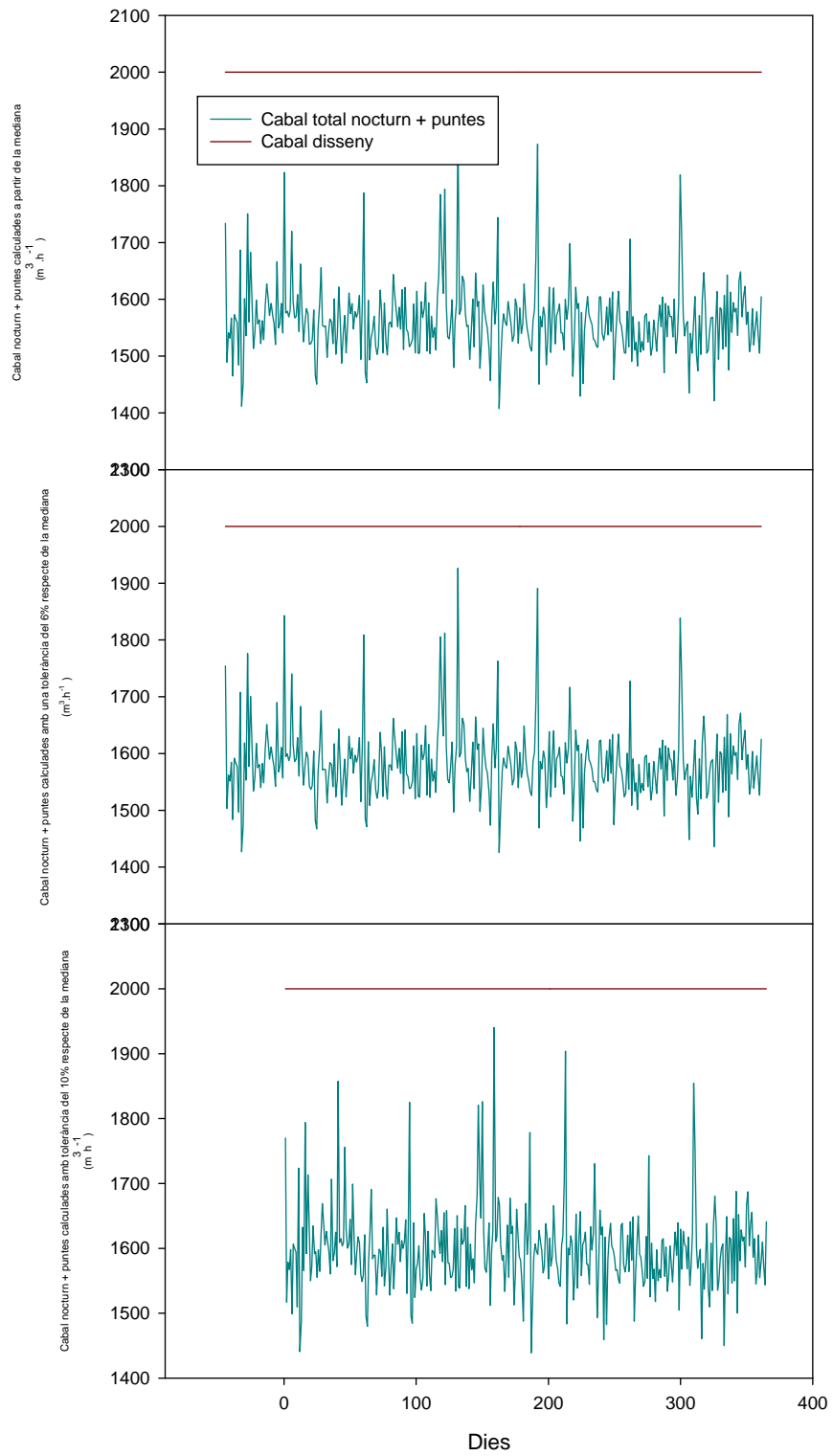


Figura A1.1: Relació de cabals a tractar (nocturn + puntes) utilitzant un tanc pulmó.

Taula A1.1: Pressupost total opció (2). Construcció i equipaments.

<b>PRESSUPOST PER TANC EMMAGATZEMATGE I EQUIPAMENTS (OPCIÓ 2). DIPÒSIT AERI</b>					
<b>MÒDULS PREFABRICATS</b>					
Dimensions Ø 15 m i 5 m alçada , Volum útil 849 .Dipòsit Aeri					
		<b>Quantitat</b>	<b>Preu (€/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Import (€)</b>	
FONAMENTACIÓ	m <sup>2</sup> capa formigó de neteja (10 cm)	186,27	11,92	2220,35	<b>11127,81</b>
	m <sup>3</sup> formigonat a llosa de base Profunditat llosa base 0,34 m	62,65	101,96	6387,79	
	Kg acer armat a llosa	817,13	1,41	1152,15	
	m <sup>2</sup> mallàs Ø 6mm c/15 cm	308,00	4,44	1367,52	
<b>ESTRUCTURA DIPÒSIT</b>	Ut subministrament, muntatge i segellat dipòsit	1	65706,30		<b>76834,11</b>
<b>ALTRES</b>	Ut connexions instal·lacions	1	400	400	<b>400</b>
<b>TOTAL DIPÒSIT</b>					<b>77234,11</b>
<b>SISTEMA DE BOMBAMENT</b>					
Bomba GRUNDFOS, Ref. SL1.100.150.75 Codi 96873385 Amb suports, tubs guia i caldereria individual interior del dipòsit				10842	<b>10842</b>
Conjunt sistema de mesura de nivell a l'interior del dipòsit				1630	<b>1630</b>
Conjunt vàlvules i carrets de desmuntatge individual				1962	<b>1962</b>
Canonada de polietilè PN-6 Ø 200 mm. Electrosoldada, transport, treball i part d'accessoris proporcional (50 m. Longitud)				1315	<b>1315</b>
Quadre elèctric de control i variadors externs: Armari polièster Himel PLM 86 doble porta Conjunt disjuntors tèrmics potència graduable, disjuntors maniobra, trafo Variador OMRON classificació IP-54 externs Estructura inoxidable comú per a tots els elements (muntatge mural)				4557	<b>4557</b>
<b>TOTAL SISTEMA BOMBAMENT I ACCESSORIS</b>					<b>20306</b>
<b>SISTEMA D'AGITACIÓ</b>					
Agitador horitzontal submergible inoxidable Model CRI-MAN Potència en el eix 50 Hz, 2,2 kW. hèlix 3 pales, Ø 210 mm amb anella canalització				3100	<b>3100</b>
Barra guia per agitador				1753	<b>1753</b>
<b>TOTAL SISTEMA D'AGITACIÓ</b>					<b>4853</b>
<b>TOTAL PRESSUPOST OPCIÓ (2)</b>					<b>102393,11</b>

Taula A1.2: Pressupost total opció (3). Construcció i equipaments.

<b>PRESSUPOST PER TANC EMMAGATZEMATGE I EQUIPAMENTS (OPCIÓ 3). DIPÒSIT AERI MÒDULS PREFABRICATS</b>					
Dimensions Ø 20 m i 3 m alçada , Volum útil 880 m <sup>3</sup> , Profunditat llosa base 0,36 m					
		<b>Quantitat</b>	<b>Preus (€/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Import (€)</b>	
<b>FONAMENTACIÓ</b>	m <sup>2</sup> capa formigó de neteja (10 cm)	326,85	11,92	3896,05	<b>20175,97</b>
	m <sup>3</sup> formigonat a llosa de base	117,00	101,96	11929,32	
	Kg acer armat a llosa	1108,00	1,41	1562,28	
	m <sup>2</sup> mallàs Ø 6mm c/15 cm	628,00	4,44	2788,32	
<b>ESTRUCTURA DIPÒSIT</b>	Ut. subministrament, muntatge i segellat dipòsit	1	59210,20		<b>59210,20</b>
<b>ALTRES</b>	Ut. connexions instal·lacions	1	400	400	<b>400</b>
<b>TOTAL DIPÒSIT</b>					<b>79786,17</b>
<b>SISTEMA DE BOMBAMENT</b>					
Bomba GRUNDFOS, Ref. SL1.100.150.75 Codi 96873385 Amb suports, tubs guia i caldereria individual interior del dipòsit				13945	<b>13945</b>
Conjunt sistema de mesura de nivell a l'interior del dipòsit				1630	<b>1630</b>
Conjunt vàlvules i carrets de desmuntatge individual				1962	<b>1962</b>
Canonada de polietilè PN-6 Ø 200 mm. Electrosoldada, transport, treball i part d'accessoris proporcional (50 m. Longitud)				1315	<b>1315</b>
Quadre elèctric de control i variadors externs: Armari polièster Himel PLM 86 doble porta Conjunt disjuntors tèrmics potència graduable, disjuntors maniobra, trafo Variador OMRON classificació IP-54 externs Estructura inoxidable comú per a tots els elements (muntatge mural)				4557	<b>4557</b>
<b>TOTAL SISTEMA BOMBAMENT I ACCESSORIS</b>					<b>23409</b>
<b>SISTEMA D'AGITACIÓ</b>					
Agitador horitzontal submergible inoxidable Model CRI-MAN Potència en el eix 50 Hz, 2,2 kW. hèlix 3 pales, Ø 210 mm amb anella canalització			3100		<b>3100</b>
Barra guia per agitador			1752,7		<b>1752,7</b>
<b>TOTAL SISTEMA D'AGITACIÓ</b>					<b>4853</b>
<b>TOTAL PRESSUPOST OPCIÓ (3)</b>					<b>108048,2</b>

Taula AI.3: Relació de volums i costos d'aeració per opció tanc (2).

RELACIÓ DE VOLUMS I COSTOS D'AERACIÓ SEGONS MESOS opció tanc (2)								
MES	kWh/m <sup>3</sup> aeració	Volum tractat (m <sup>3</sup> )	kWh totals	Cost del tractament diürn hores punta cas(A) 0,117241€/kWh	Cost del tractament diürn hores pla (cas B) 0,106157 €/kWh	Cost del tractament Nocturn hores vall 0,084506 €/kWh	Estalvi assolit cas (A)	Estalvi assolit cas (B)
Gener	0,34	20110	6837,4	801,62	725,84	577,80	223,82	148,04
Febrer	0,34	16763	5699,42	668,21	605,03	481,64	186,57	123,40
Març	0,4	18925	7.570	887,51	803,61	639,71	247,80	163,90
Abril	0,42	17777	7466,34	875,36	792,60	630,95	244,41	161,65
Maig	0,41	18628	7637,48	895,43	810,77	645,41	250,01	165,36
Juny	0,45	18627	8382,15	982,73	889,82	708,34	274,39	181,48
Juliol	0,43	18171	7813,53	916,07	829,46	660,29	255,78	169,17
Agost	0,57	18967	10811,19	1267,51	1147,68	913,61	353,90	234,07
Set.	0,45	17920	8064	945,43	856,05	681,46	263,98	174,59
Oct.	0,47	16672	7835,84	918,68	831,83	662,18	256,51	169,65
Nov.	0,47	17564	8255,08	967,83	876,33	697,60	270,23	178,73
Des.	0,45	16227	7302,15	856,11	775,17	617,08	239,04	158,10
<b>TOTAL ESTALVI ANUAL PER OPCió TANC (2)</b>							<b>3066,44</b>	<b>2028,15</b>

Taula A1.4.: Relació de volums i costos d'aeració per opció tanc (3).

RELACIÓ DE VOLUMS I COSTOS D'AERACIÓ SEGONS MESOS opció tanc (3)								
MES	kWh/m <sup>3</sup> aeració	Volum tractat (m <sup>3</sup> )	kWh totals	Cost del tractament diürn hores punta cas(A) 0,117241€/kWh	Cost del tractament diürn hores pla (cas B) 0,106157 €/kWh	Cost del tractament Nocturn hores vall 0,084506 €/kWh	Estalvi assolit cas (A)	Estalvi assolit cas (B)
Gener	0,34	20971	7130,14	835,94	756,91	602,54	233,41	154,37
Febrer	0,34	20180	6861,20	804,41	728,36	579,81	224,60	148,55
Març	0,4	22676	9070,40	1063,42	962,89	766,50	296,92	196,38
Abril	0,42	21.38	9045,96	1060,56	960,29	764,44	296,12	195,85
Maig	0,41	22470	9212,70	1080,11	977,99	778,53	301,58	199,46
Juny	0,45	22436	10096,20	1183,69	1071,78	853,19	330,50	218,59
Juliol	0,43	21994	9457,42	1108,80	1003,97	799,21	309,59	204,76
Agost	0,57	22726	12953,82	1518,72	1375,14	1094,68	424,04	280,46
Setembre	0,45	21598	9719,10	1139,48	1031,75	821,32	318,15	210,43
Octubre	0,47	20862	9805,14	1149,56	1040,88	828,59	320,97	212,29
Novembre	0,47	21262	9993,14	1171,61	1060,84	844,48	327,13	216,36
Desembre	0,45	22006	9902,70	1161,00	1051,24	836,84	324,16	214,40
<b>TOTAL ESTALVI ANUAL PER OPCIO TANC (3)</b>							<b>3.707,17</b>	<b>2.451,93</b>

Taula AI.5 : Càlcul del VAN i PR per opció (2). Dipòsit 849 m<sup>3</sup> aeri.

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	-102393,1															
FC		3066,44	3066,44	066,44	3066,44	3066,44	3066,44	3066,44	3066,44	3066,44	3066,44	3066,44	3066,44	3066,44	3066,44	3066,44
r	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%
(1+r) <sup>n</sup>	1	1,075	1,156	1,242	1,335	1,436	1,543	1,659	1,783	1,917	2,061	2,216	2,382	2,560	2,752	2,959
1/(1+r) <sup>n</sup>	1	0,93	0,86	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,56	0,52	0,48	0,45	0,42	0,39	0,36	0,34
FCd	-102393,1	2852,50	2652,63	2468,95	2296,96	2135,40	1987,32	1848,37	1719,82	1599,60	1487,84	1383,77	1287,34	1197,83	1114,26	1036,31
n		16	17	18	19	20										
FC		3066,44	3066,44	3066,44	3066,44	3066,44										
R	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%										
(1+r) <sup>n</sup>		3,18	3,42	3,67	3,95	4,25										
1/(1+r) <sup>n</sup>		0,31	0,29	0,27	0,25	0,23										
FCd	-102393,1	964,29	896,62	835,54	776,31	721,52										

$VAN = - 102393,1 + \sum FCd = - 102393 + 31263,19 = - 71129,81$  VAN < 0 INVERSIÓ NO RECOMANABLE

Període de retorn (PR)

n	A	FC	Fcac
1	<b>102.393,1</b>		
2		3066,44	3066,44
3		3066,44	6132,88
4		3066,44	9199,32
5		3066,44	12265,76
6		3066,44	15332,2
7		3066,44	18398,64
8		3066,44	21465,08
9		3066,44	24531,52
10		3066,44	27597,96
11		3066,44	30664,4
12		3066,44	33730,84

n= nombre d'anys A= inversió inicial FC Fluxos de caixa anuals Fcac = Fluxos de caixa acumulats Recomanable un PR comprès entre 2 i 4 anys ( INVERSIÓ NO VIABLE)

Taula AI.6 : Càlcul del VAN i PR per opció (3). Dipòsit 880 m<sup>3</sup> aeri.

n	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A	-108048															
FC		3707,17	3707,17	3707,17	3707,17	3707,17	3707,17	3707,17	3707,17	3707,17	3707,17	3707,17	3707,17	3707,17	3707,17	3707,17
r	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%
(1+r) <sup>n</sup>	1	1,075	1,156	1,242	1,335	1,436	1,543	1,659	1,783	1,917	2,061	2,216	2,382	2,560	2,752	2,959
1/(1+r) <sup>n</sup>	1	0,93	0,86	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,56	0,52	0,48	0,45	0,42	0,39	0,36	0,34
FCd	-108048	3448,53	3206,89	2984,84	2776,91	2581,59	2402,57	2234,58	2079,17	1933,84	1798,73	1672,91	1556,32	1448,11	1.347,08	1252,84
n		16	17	18	19	20										
FC		3707,17	3707,17	3707,17	3707,17	3707,17										
r	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%										
(1+r) <sup>n</sup>		3,18	3,42	3,67	3,95	4,25										
1/(1+r) <sup>n</sup>		0,31	0,29	0,27	0,25	0,23										
FCd	-108048	1165,78	1083,97	1010,12	938,52	872,27										

$$VAN = -108048 + \sum FCd = -108048 + 37795,6 = -70252,4 \quad \underline{VAN < 0 \text{ INVERSIÓ NO RECOMANABLE}}$$

Període de retorn (PR)

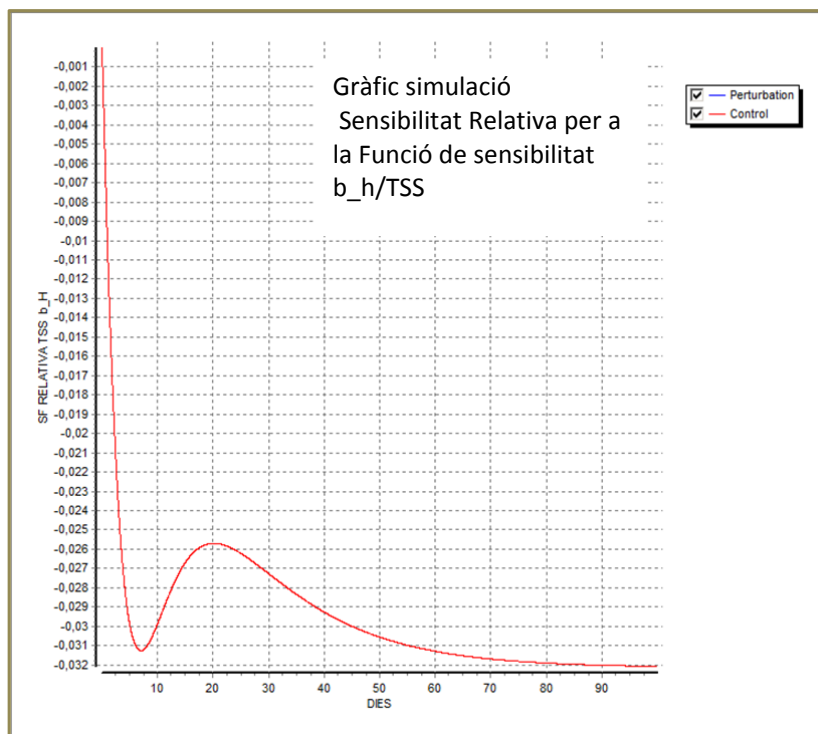
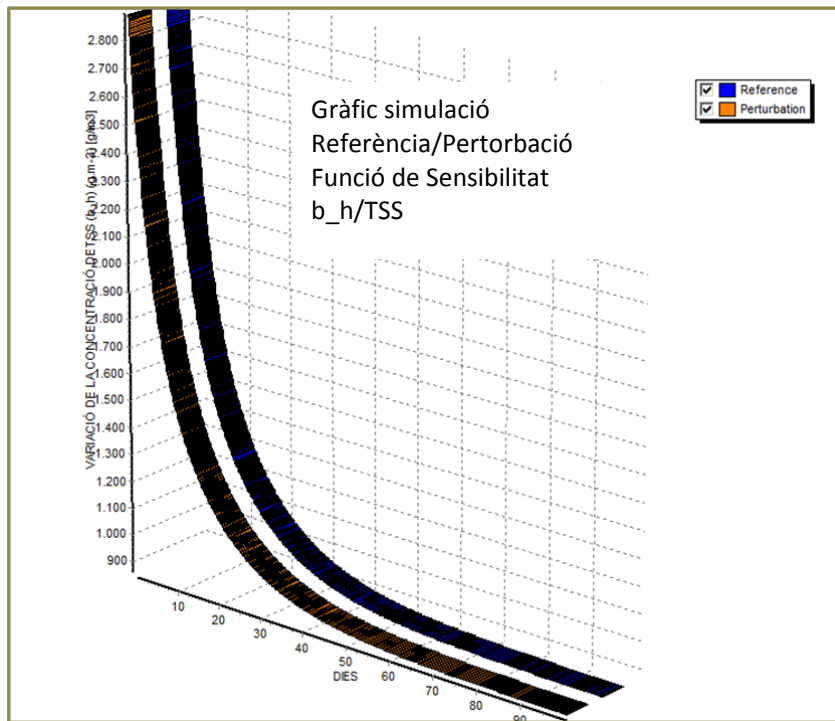
n	A	FC	Fcac
1	108.048		
2		3707,17	3707,17
3		3707,17	7414,34
4		3707,17	11121,51
5		3707,17	14828,68
6		3707,17	18535,85
7		3707,17	22243,02
8		3707,17	25950,19
9		3707,17	29657,36
10		3707,17	33364,53
11		3707,17	37071,70
12		3707,17	40778,87

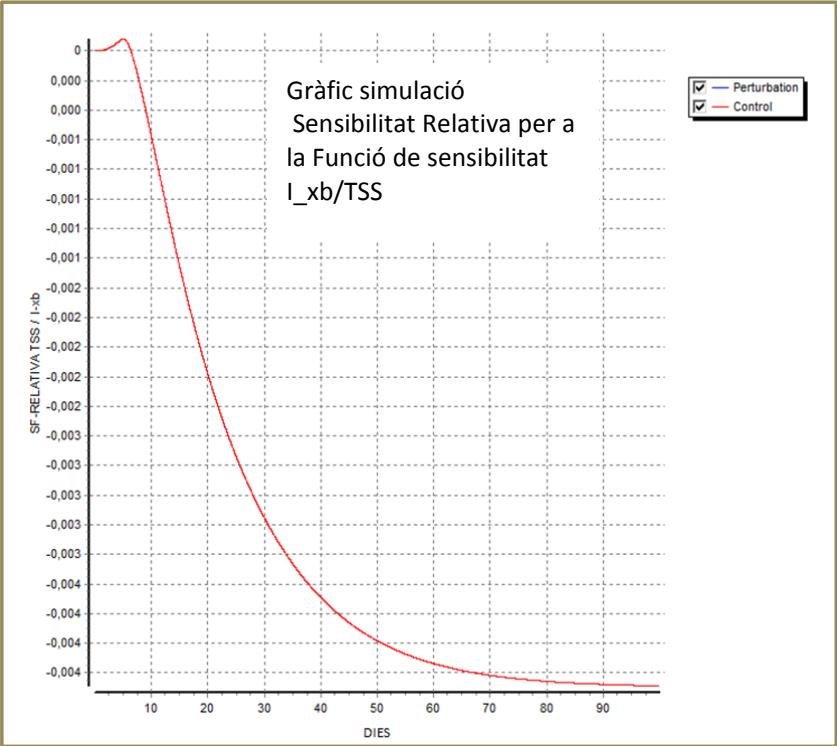
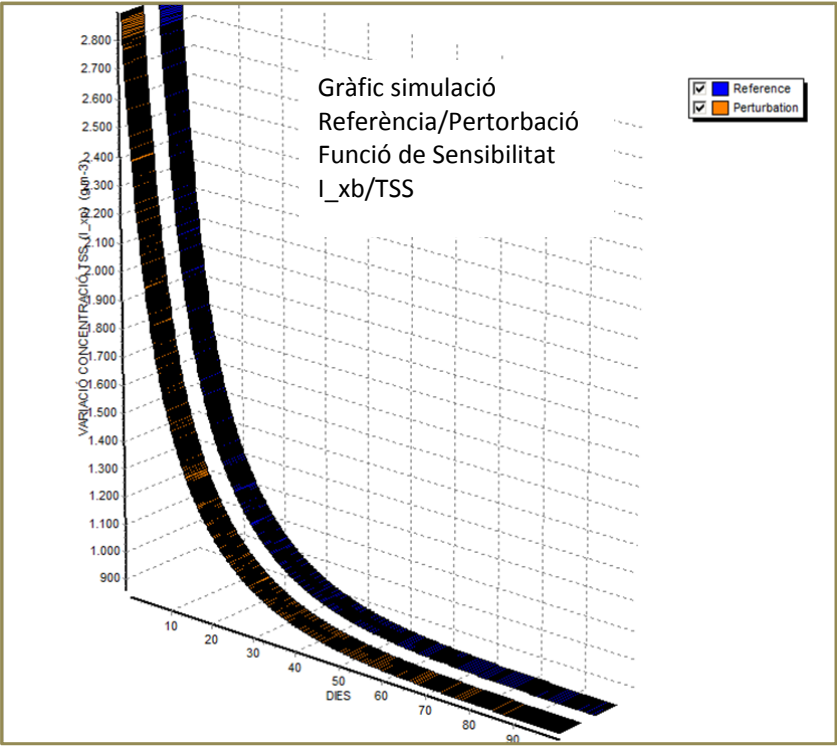
n= nombre d'anys A= inversió inicial FC Fluxos de caixa anuals Fcac = Fluxos de caixa acumulats Recomanable un PR comprès entre 2 i 4 anys ( INVERSIÓ NO VIABLE)

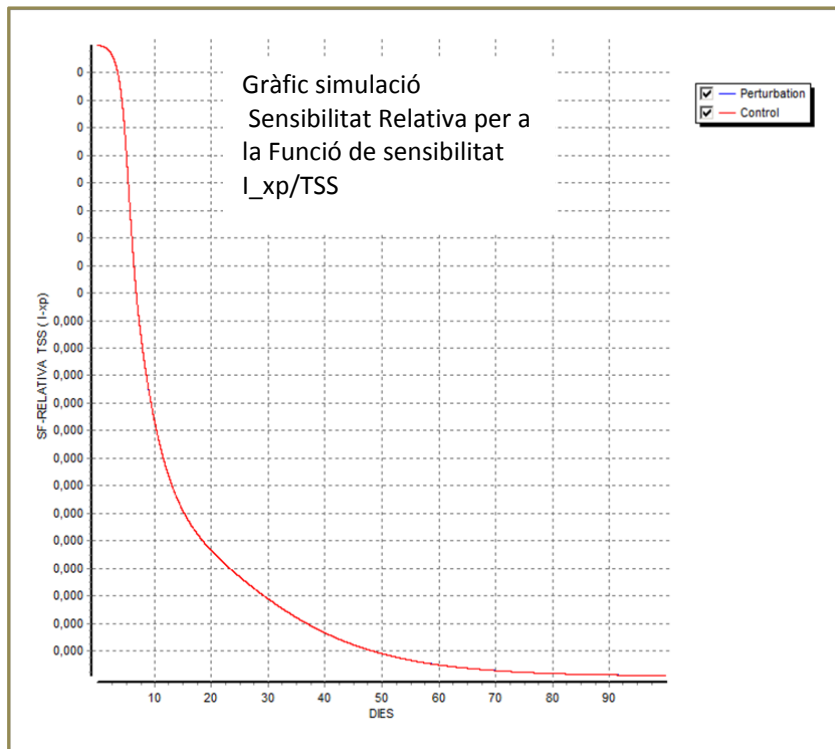
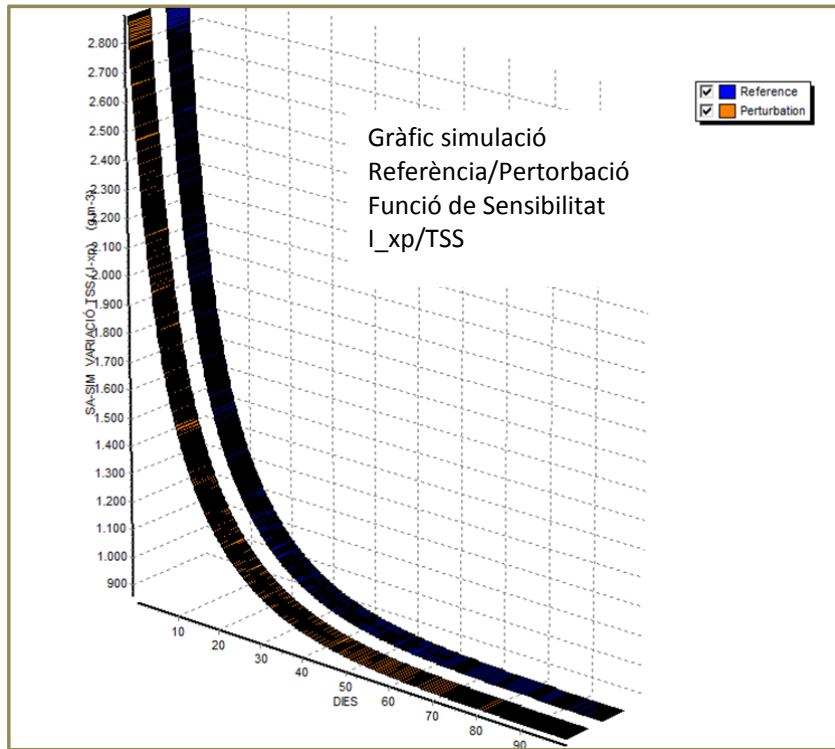




Figures A1.2: Gràfics anàlisi de sensibilitat per a la variable TSS

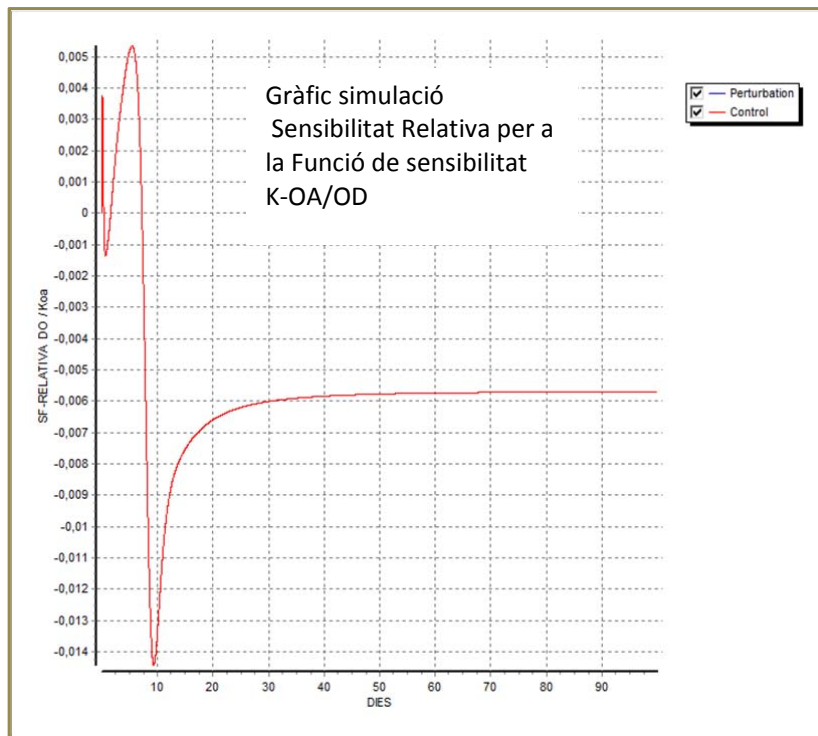
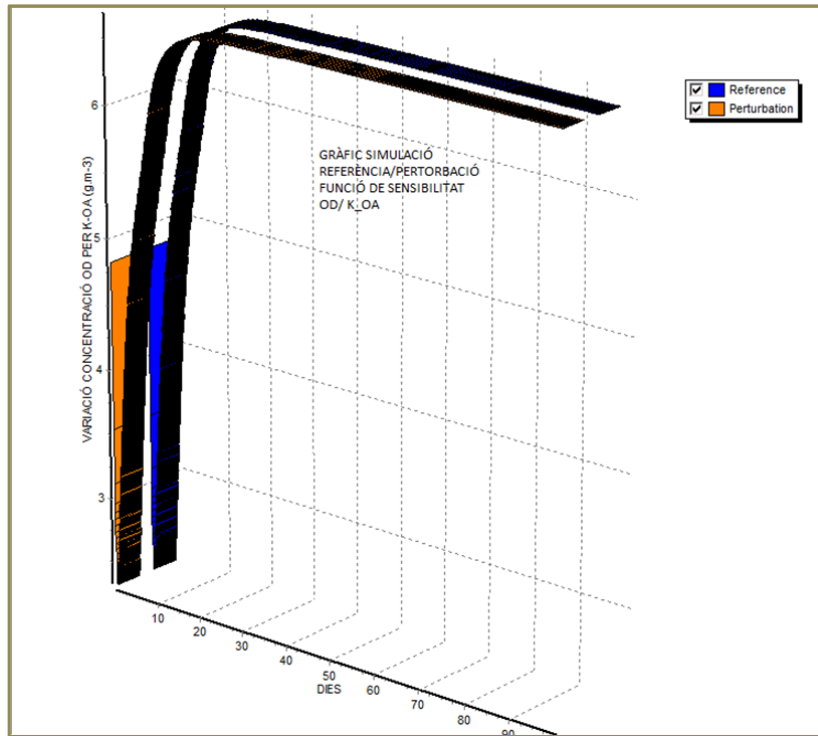


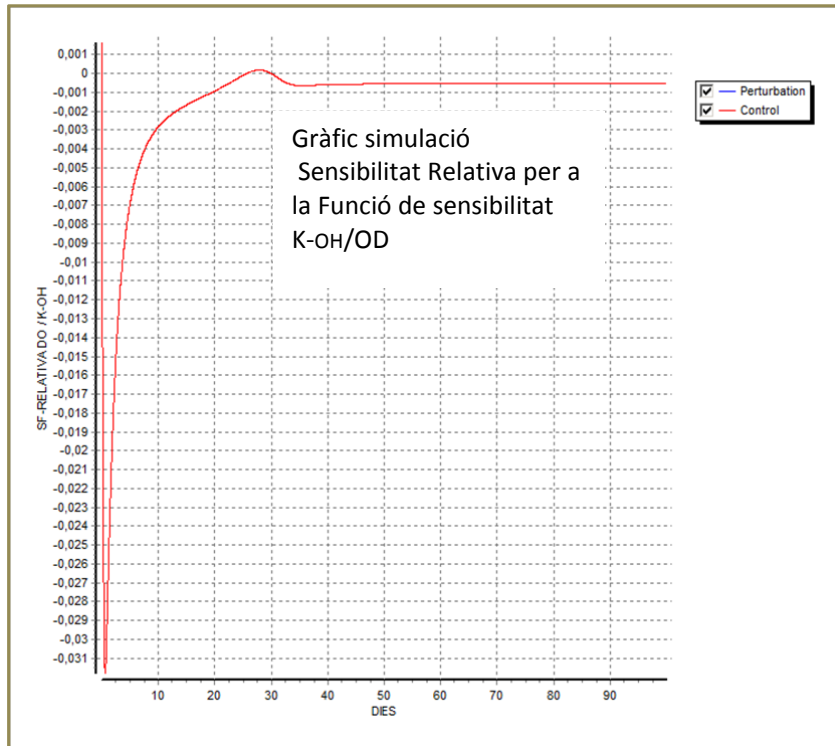
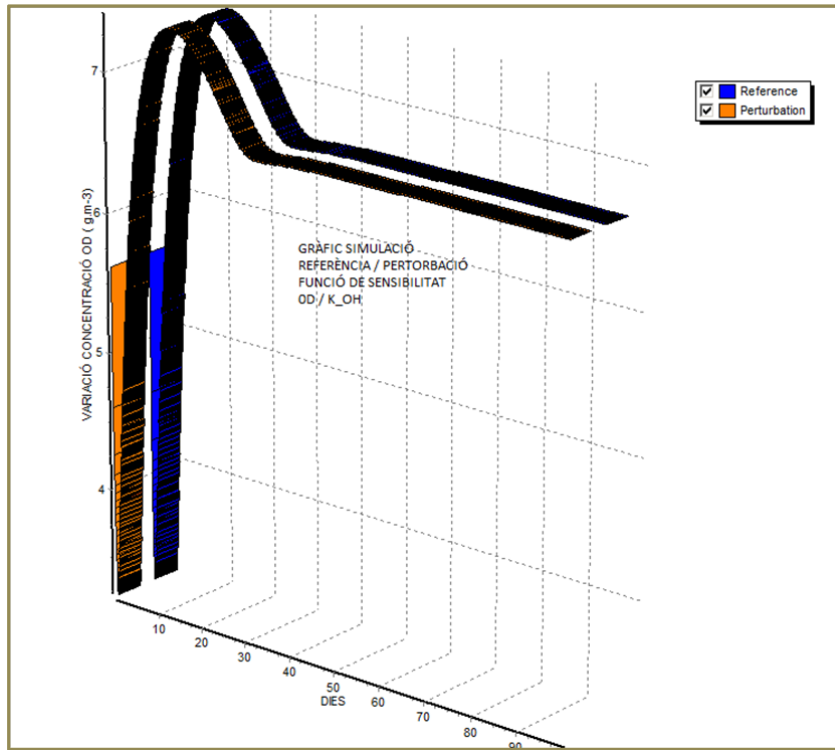


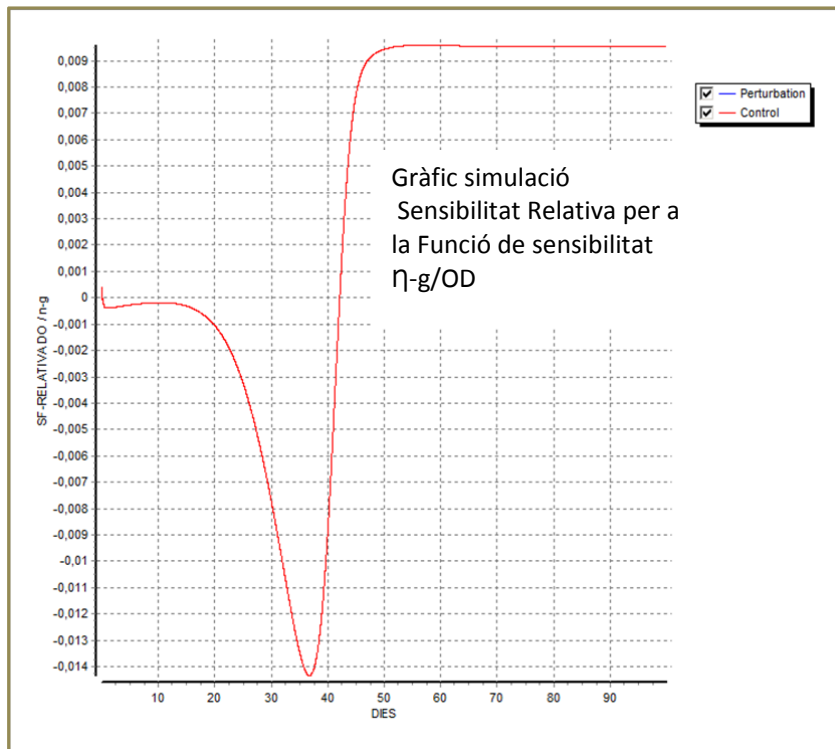
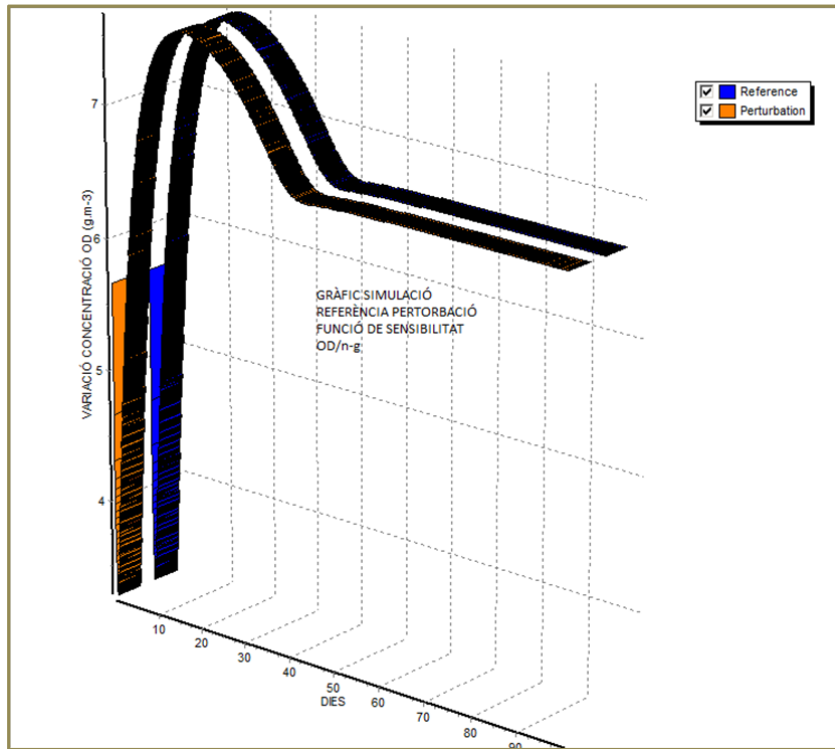




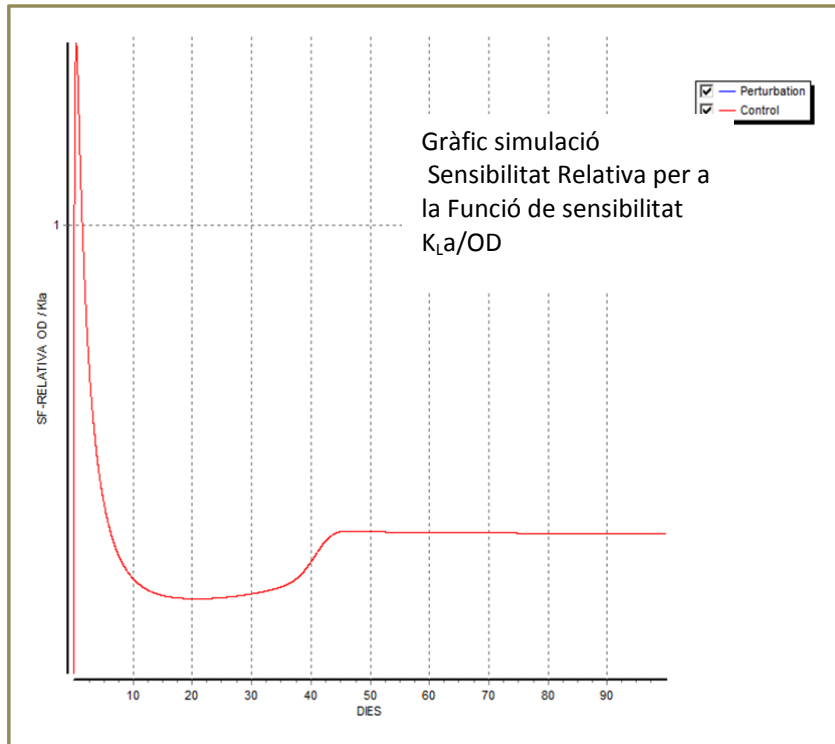
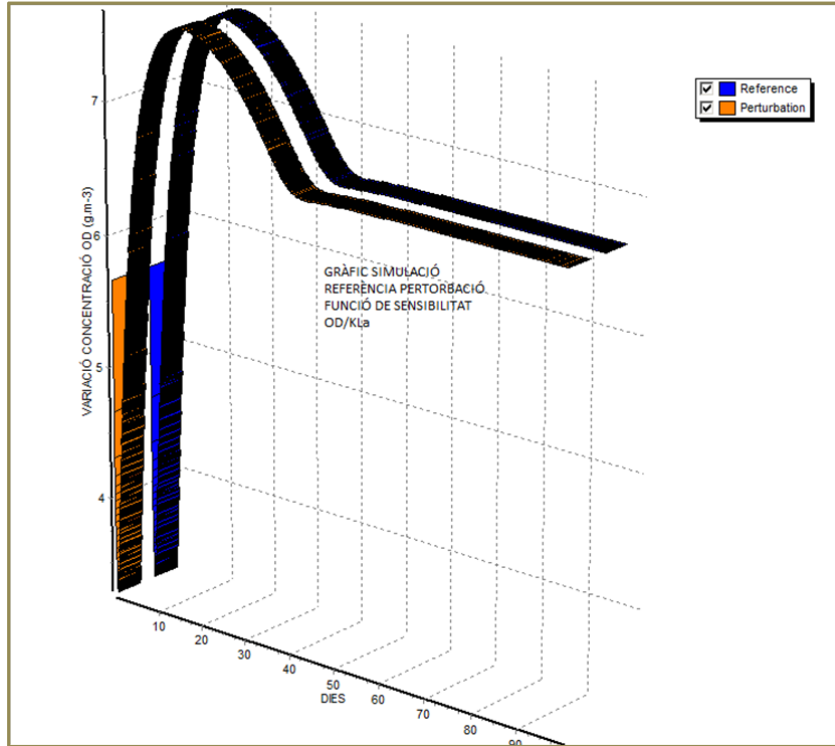
Figures A1.3: Gràfics anàlisi de sensibilitat per a la variable OD



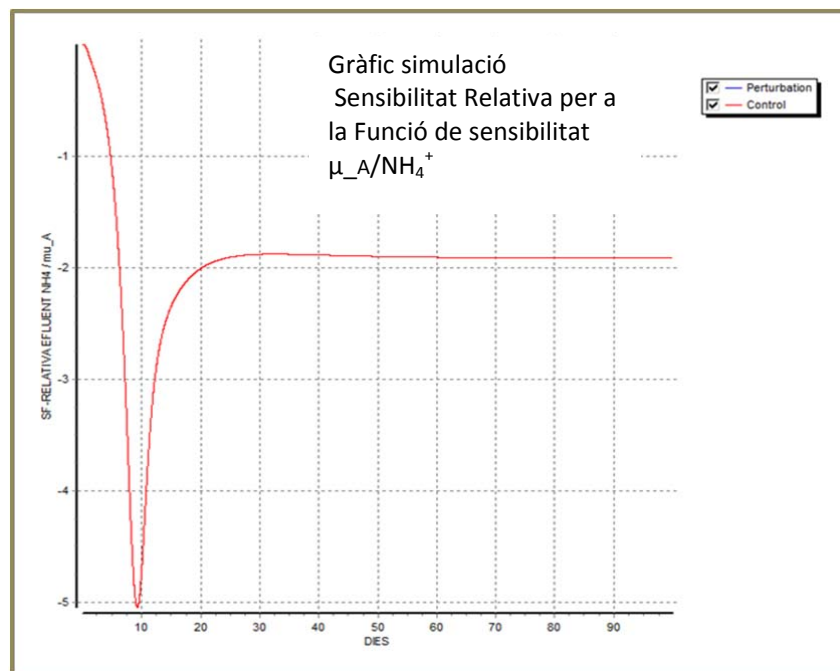
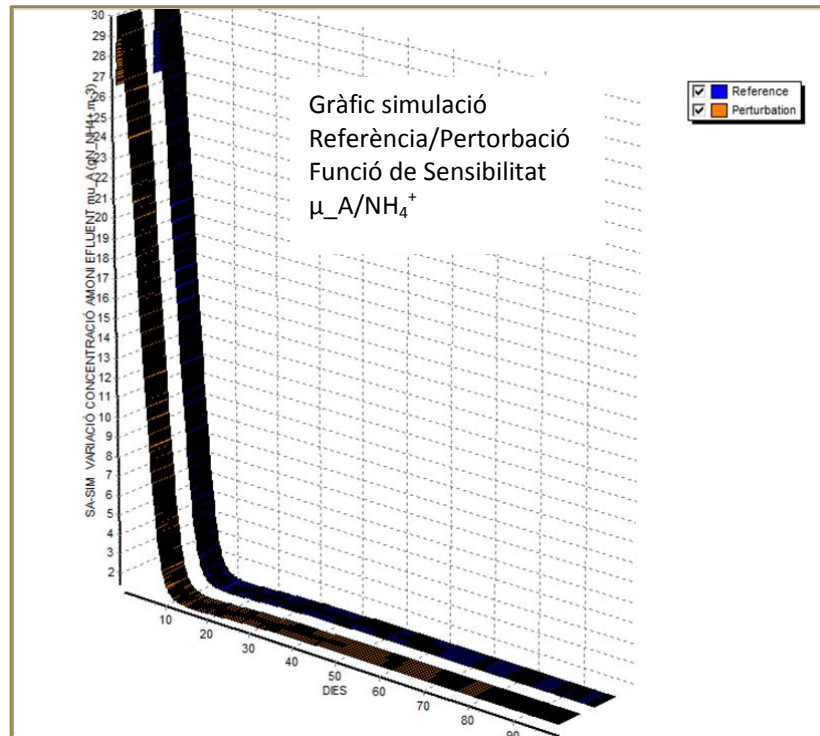


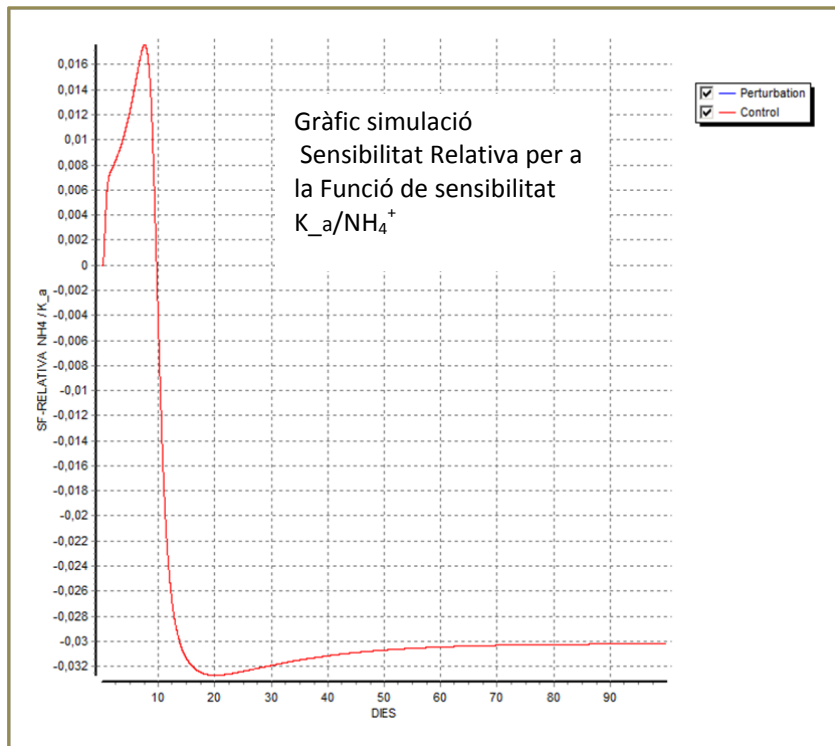
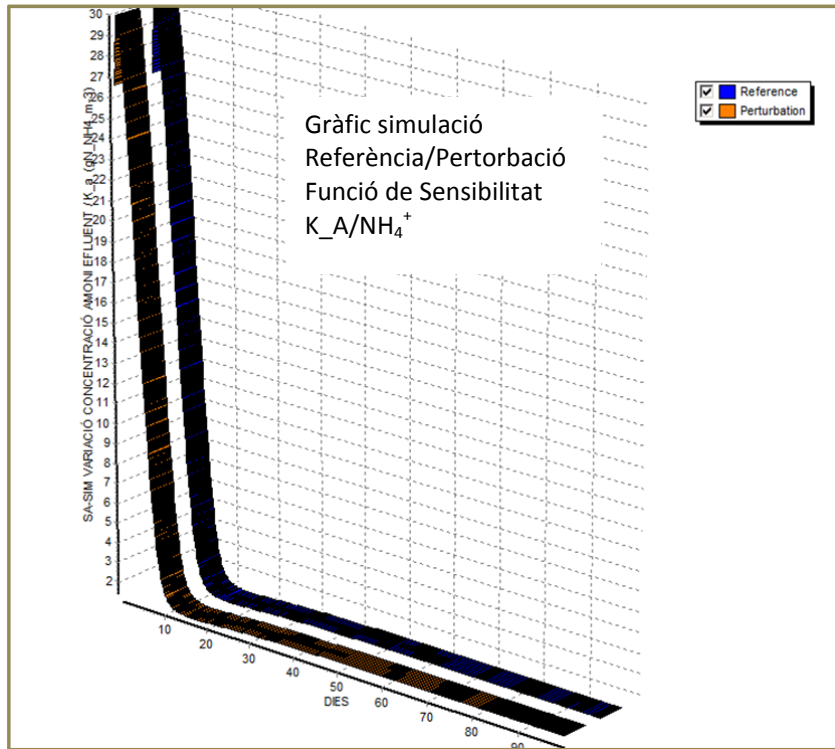


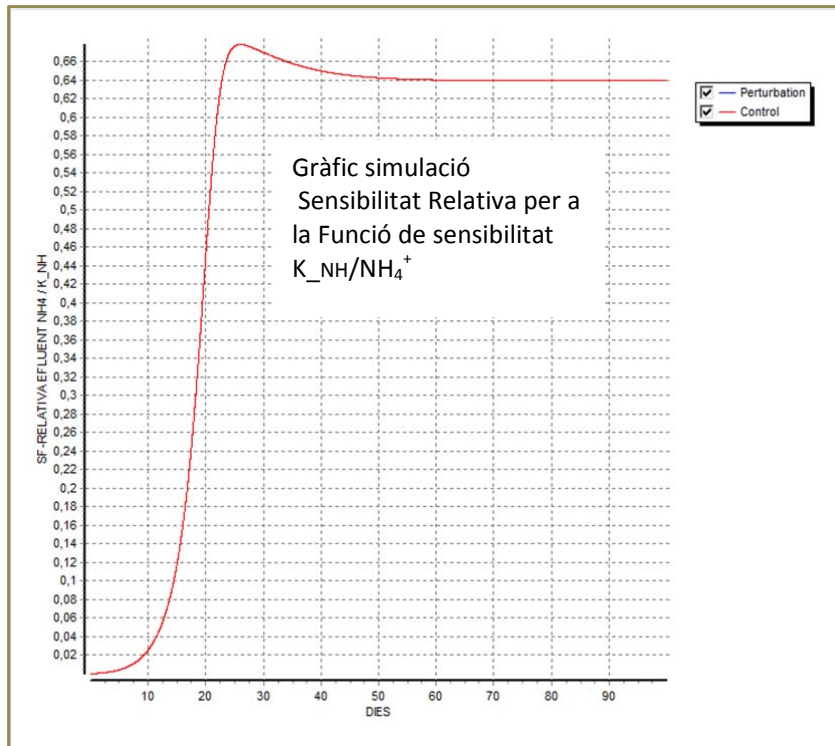
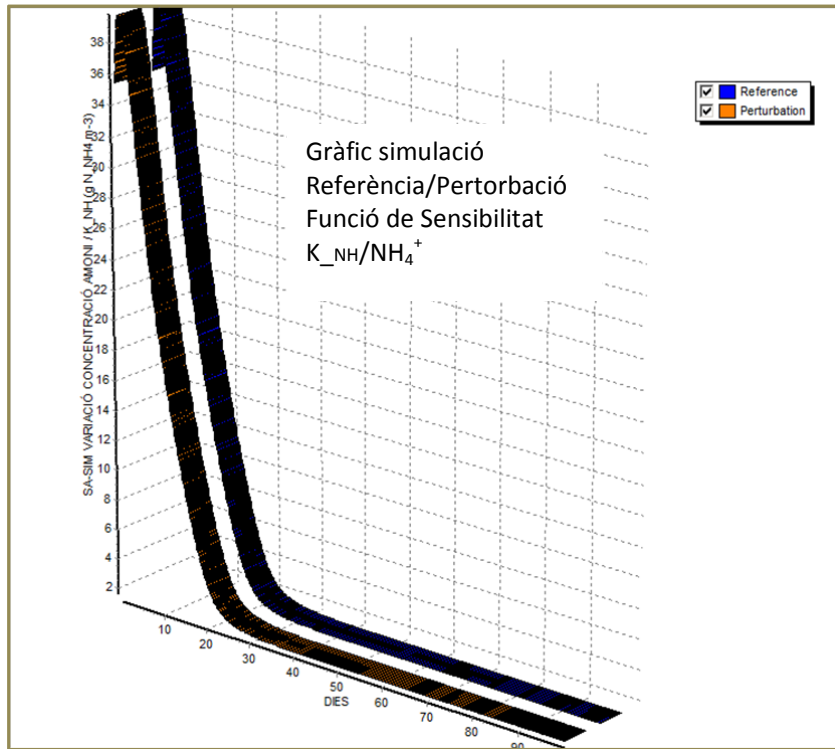




Figures AI.4: Gràfics anàlisi de sensibilitat per a la variable  $\text{NH}_4^+$  efluent

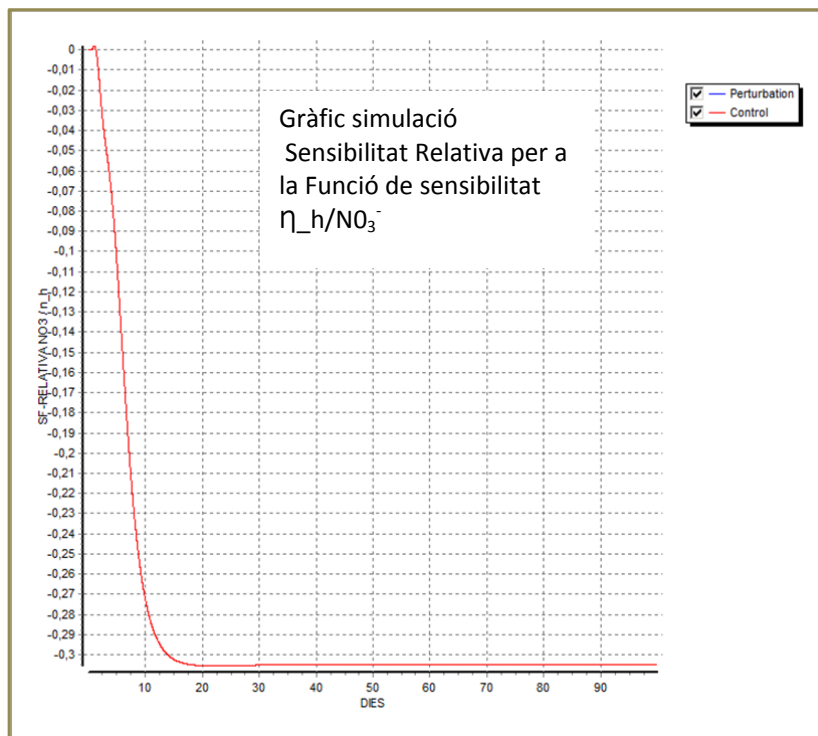
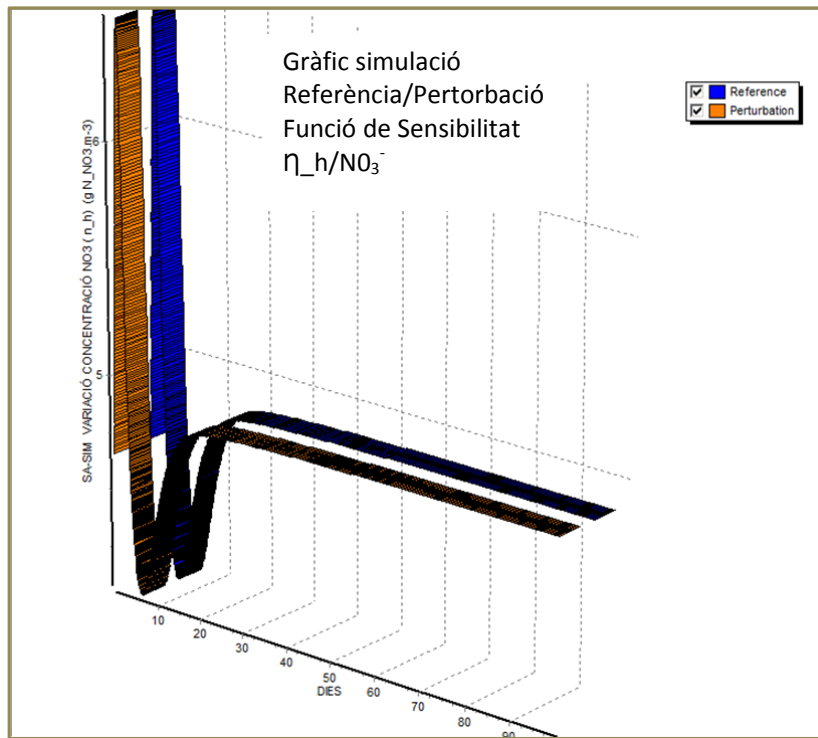


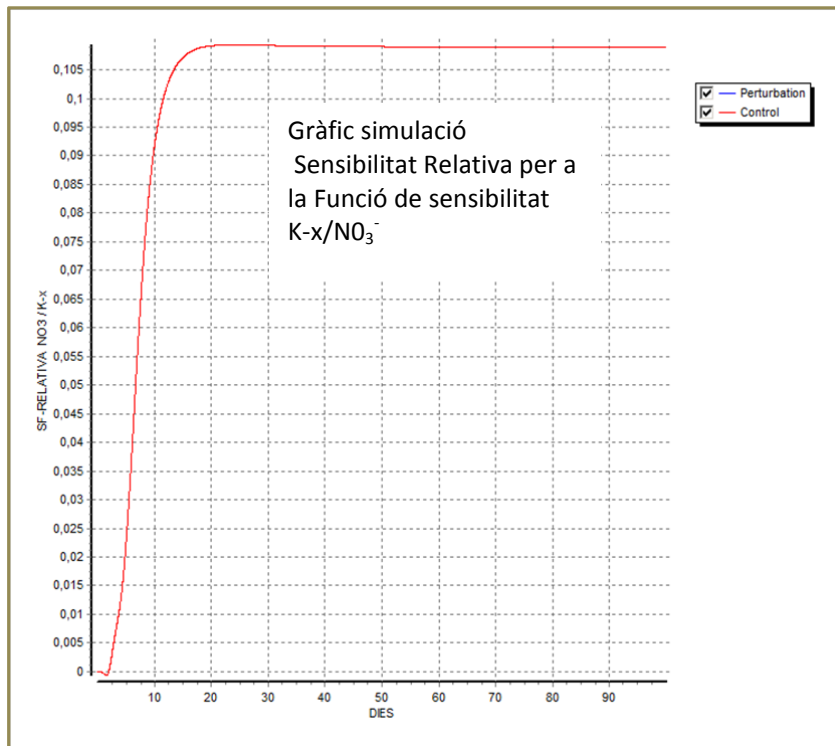
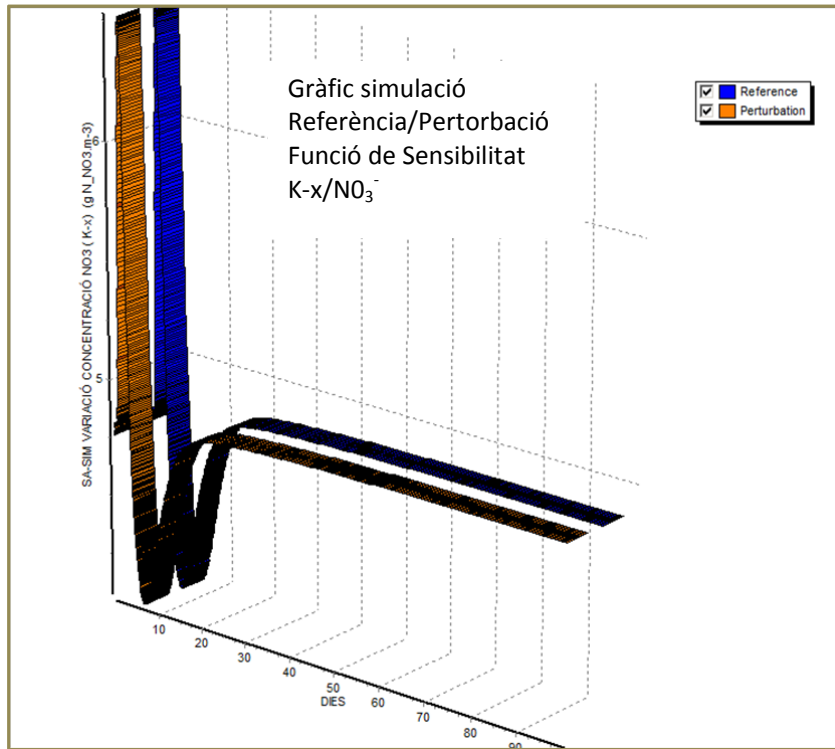


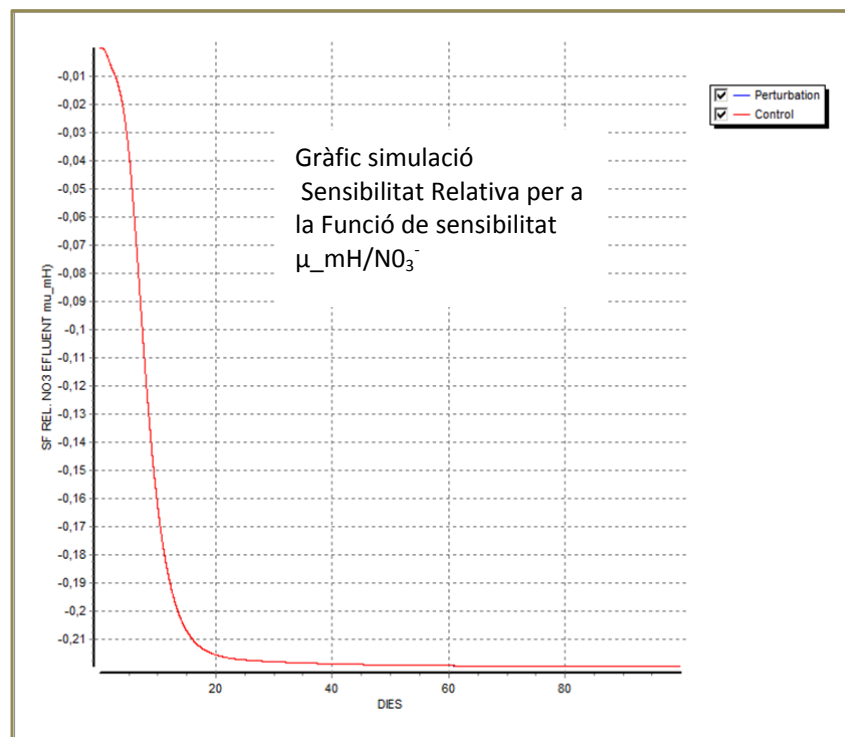
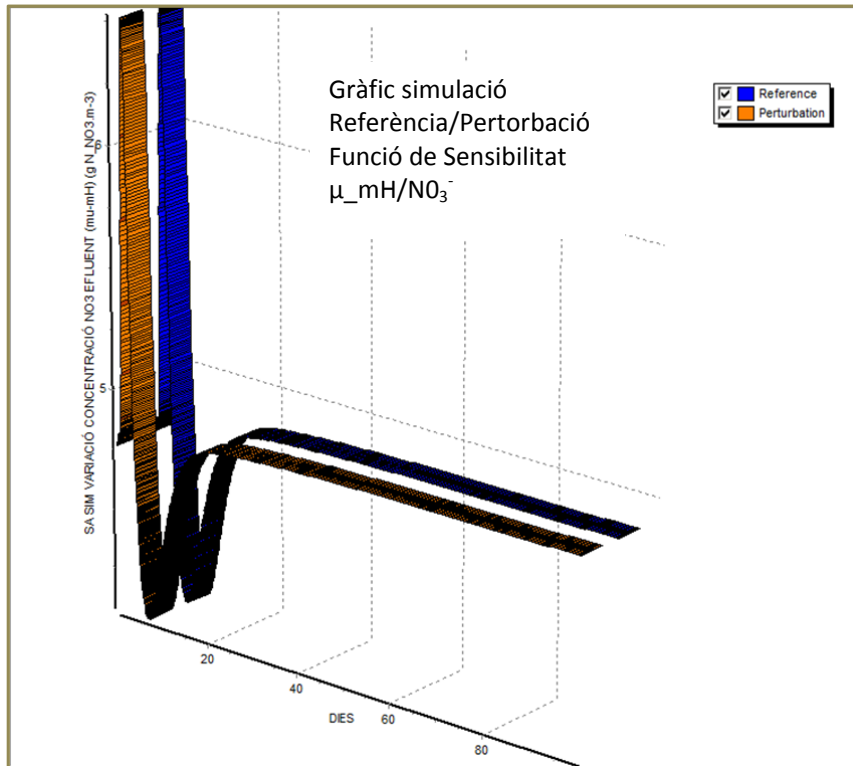




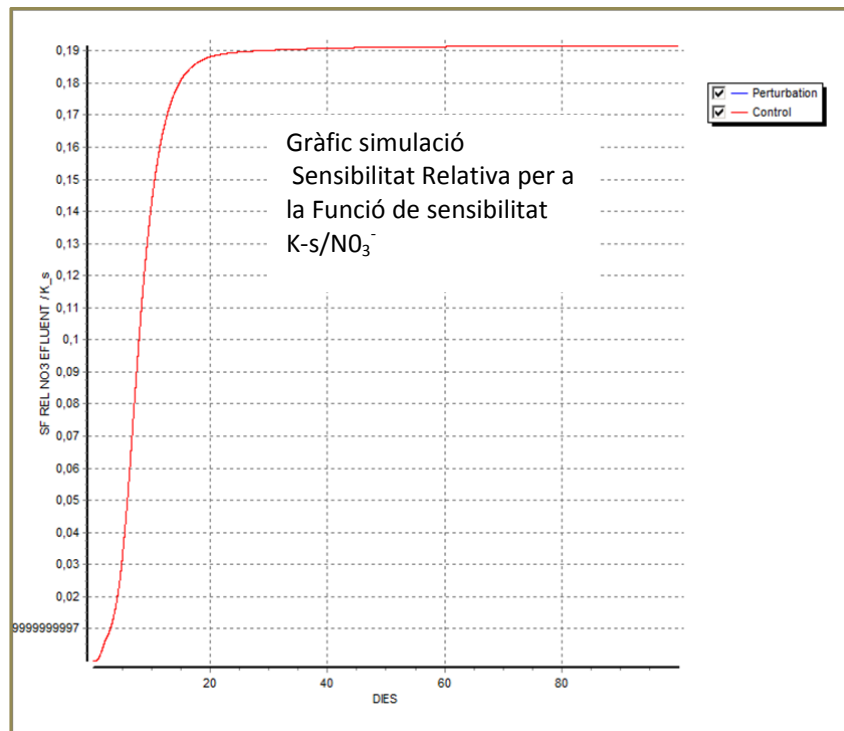
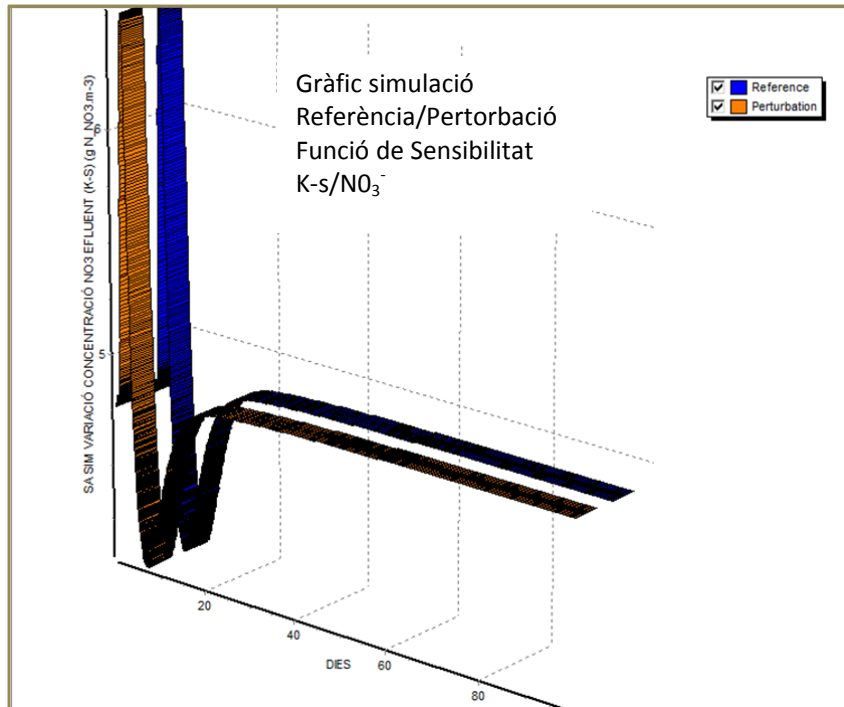
Figures A1.5: Gràfics anàlisi de sensibilitat per a la variable  $\text{NO}_3^-$

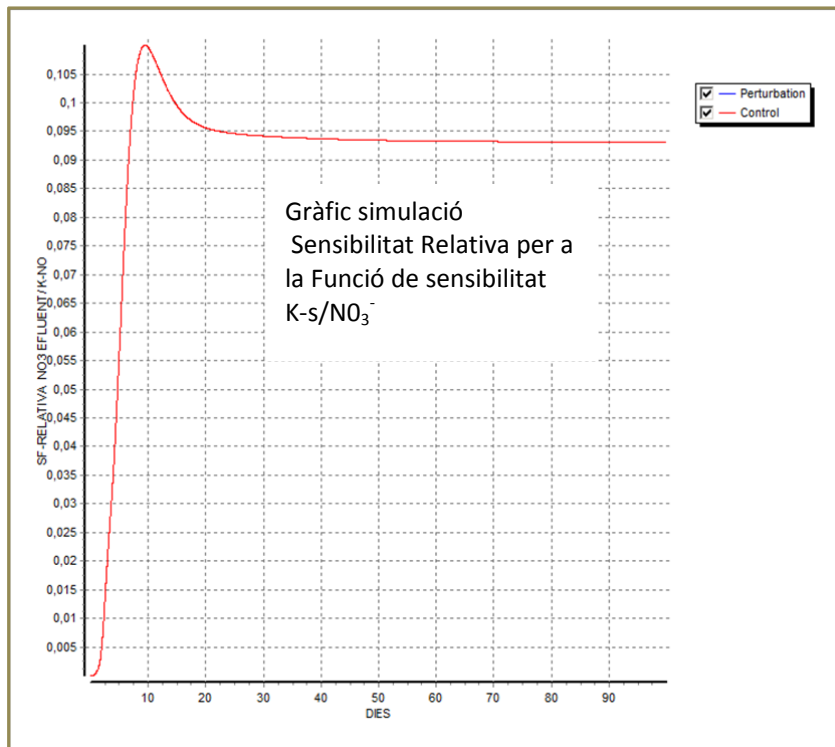
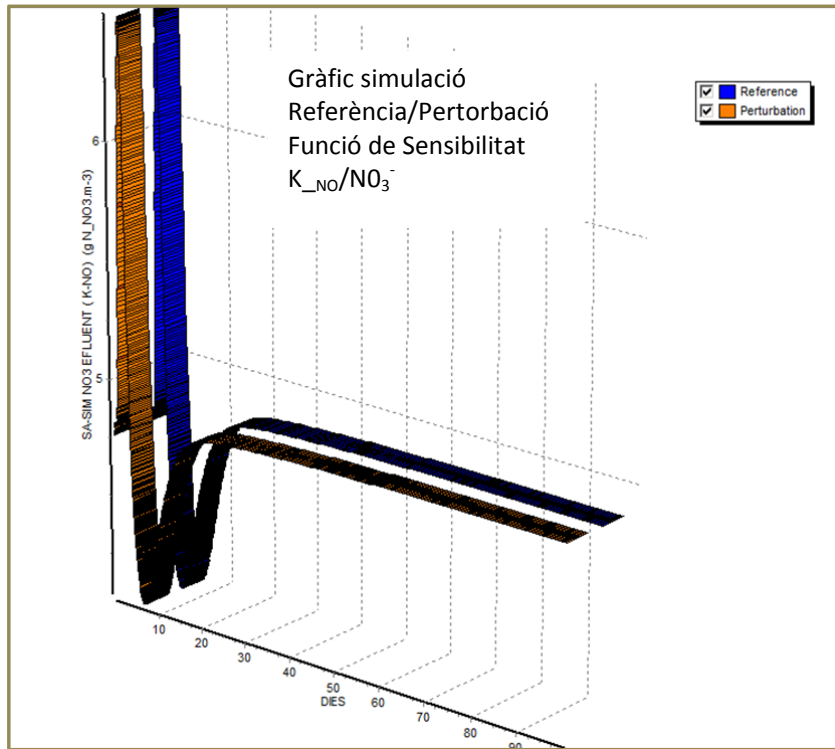








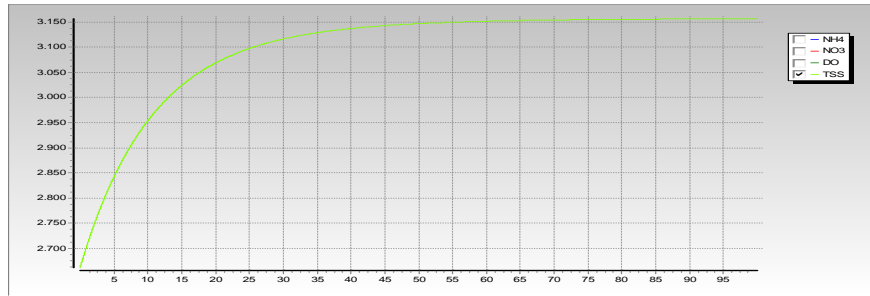




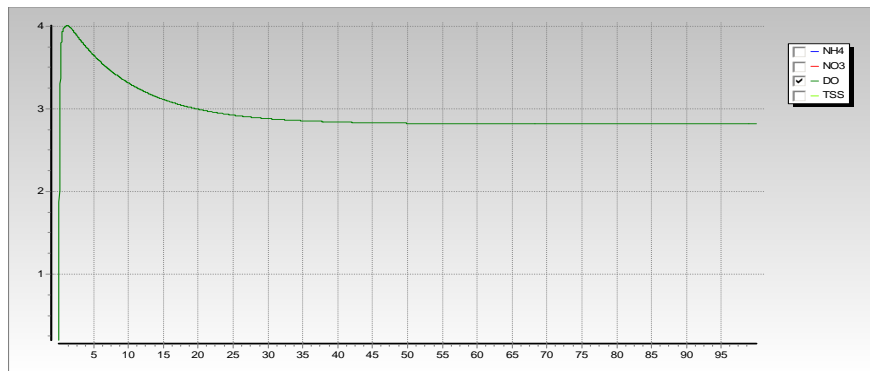


Figures AI.6: Sortida model per al calibratge en estat estacionari

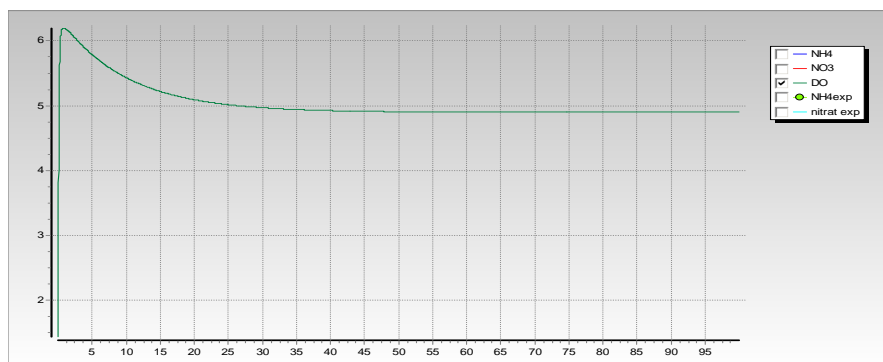
### TSS reactor biològic



### OD reactor intermedi (ASU-4)



### OD reactor intern (ASU-5)





Taula AI.7: Resultats del model per a la simulació en *open-loop*.

RESULTATS DEL MODEL PER A DIFERENTS SIMULACIONS			
		OPEN-LOOP	
<b>TERMES DE COSTOS</b>			
		UNITATS	
MITJANA DE PRODUCCIÓ DE FANGS PER DIA		kgTSS·d <sup>-1</sup>	1162
MITJANA ENERGIA D'AERACIÓ		kWh·d <sup>-1</sup>	1173
MITJANA ENERGIA DE BOMBAMENT		kWh·d <sup>-1</sup>	139
MITJANA ENERGIA DE MESCLA		kWh·d <sup>-1</sup>	404
ÍNDEX DE COST OPERACIONAL (OCI)		adimensional	7389
<b>TERMES D'ACOMPLIMENT AMBIENTAL</b>			
ÍNDEX DE QUALITAT DE L'EFLUENT		kg unitats de contaminant · d <sup>-1</sup>	979
<u>N TOTAL</u>			
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (18 mg N·L <sup>-1</sup> )		%	15,3
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			8
<u>AMONI</u>			
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (4 mg N·L <sup>-1</sup> )		%	32,6
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			23
<u>TSS</u>			
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERATS EL LÍMITS (30 mgTSS·L <sup>-1</sup> )		%	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			0
<u>COD</u>			
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERATS EL LÍMITS (100 mgCOD·L <sup>-1</sup> )		%	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			0
<u>BOD5</u>			
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (10 mg·L <sup>-1</sup> )		%	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			0

Taula A1.8: Resultats del model per a la simulació OD control.

RESULTATS DEL MODEL PER A DIFERENTS SIMULACIONS			
		OD-CONTROL	
<b>TERMES DE COSTOS</b>			
			UNITATS
MITJANA DE PRODUCCIÓ DE FANGS PER DIA		kgTSS·d <sup>-1</sup>	1136
MITJANA ENERGIA D'AERACIÓ		kWh·d <sup>-1</sup>	768
MITJANA ENERGIA DE BOMBAMENT		kWh·d <sup>-1</sup>	139
MITJANA ENERGIA DE MESCLA		kWh·d <sup>-1</sup>	404
ÍNDEX DE COST OPERACIONAL (OCI)		adimensional	6863
<b>TERMES D'ACOMPLIMENT AMBIENTAL</b>			
ÍNDEX DE QUALITAT DE L'EFLUENT		kg unitats de contaminant · d <sup>-1</sup>	954
<u>N TOTAL</u>			
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (18 mg N·L <sup>-1</sup> )		%	7,9
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			6
<u>AMONI</u>			
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (4 mg N·L <sup>-1</sup> )		%	14,4
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			18
<u>TSS</u>			
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERATS EL LÍMITS (30 mgTSS·L <sup>-1</sup> )		%	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			0
<u>COD</u>			
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERATS EL LÍMITS (100 mgCOD·L <sup>-1</sup> )		%	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			0
<u>BOD5</u>			
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (10 mg·L <sup>-1</sup> )		%	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			0

Taula AI.9: Resultats del model per a les simulacions OD\_NH\_NO amb sensors ubicats en l'efluent.

RESULTATS DEL MODEL PER A DIFERENTS SIMULACIONS											
OD_NH_NO_EFLUENT			SP-B NH 1	SP-B NH 1	SP-B NH 2	SP-B NH 2	SP-B NH 2	SP-B NH 3	SP-B NH 4	SP-B NH 4	SP-B NH 5
TERMES DE COSTOS			SP-A NH 2	SP-A NH 3	SP-A NH 3	SP-A NH 4	SP-A NH 5	SP-A NH 5	SP-A NH 6	SP-A NH 8	SP-A NH 9
UNITATS											
MITJANA DE PRODUCCIÓ DE FANGS PER DIA	kgTSS·d <sup>-1</sup>		1140	1159	1159	1159	1159	1159	1158	1158	1158
MITJANA ENERGIA D'AERACIÓ	kWh·d <sup>-1</sup>		844	845	844	829	828	816	805	788	799
MITJANA ENERGIA DE BOMBAMENT	kWh·d <sup>-1</sup>		139	139	139	139	139	139	139	139	139
MITJANA ENERGIA DE MESCLA	kWh·d <sup>-1</sup>		471	460	462	458	460	453	449	439	437
ÍNDEX DE COST OPERACIONAL (OCI)	adimensional		6963	7054	7053	7037	7037	7024	7012	6992	6982
<b>TERMES D'ACOMPLIMENT AMBIENTAL</b>											
ÍNDEX DE QUALITAT DE L'EFLUENT	kg unitats de contaminant · d <sup>-1</sup>		1103	1021	1026	1108	1116	1201	1301	1483	1584
<b>N TOTAL</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (18 mg N·L <sup>-1</sup> )	%		3,8	4,4	7,8	5,2	4,6	5,7	6,5	7,3	9,1
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			9	3	3	3	3	3	4	4	6
<b>AMONI</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (4 mg N·L <sup>-1</sup> )	%		40,3	54,9	55,3	92,4	71	75	47	45	24
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			13	20	20	65	72	23	2	2	1
<b>TSS</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERATS EL LÍMITS (30 mgTSS·L <sup>-1</sup> )	%		0	0	0	0	0	0	0	0	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>COD</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERATS EL LÍMITS (100 mgCOD·L <sup>-1</sup> )	%		0	0	0	0	0	0	0	0	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>BOD5</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (10 mg·L <sup>-1</sup> )	%		0	0	0	0	0	0	0	0	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			0	0	0	0	0	0	0	0	0



Taula AI.10: Resultats del model per a les simulacions OD\_NH\_NO amb sensors ubicats en el reactor biològic.

RESULTATS DEL MODEL PER A DIFERENTS SIMULACIONS									
	OD_NH_NO_BIOLÒGIC				SP-B NH 1	SP-B NH 1	SP-B NH 2	SP-B NH 2	SP-B NH 2
TERMES DE COSTOS					SP-A NH 2	SP-A NH 3	SP-A NH 3	SP-A NH 4	SP-A NH 5
			UNITATS						
MITJANA DE PRODUCCIÓ DE FANGS PER DIA			kgTSS·d <sup>-1</sup>		11363	1136	1136	1136	1136
MITJANA ENERGIA D'AERACIÓ			kWh·d <sup>-1</sup>		716	715	716	715	716
MITJANA ENERGIA DE BOMBAMENT			kWh·d <sup>-1</sup>		139	139	139	139	139
MITJANA ENERGIA DE MESCLA			kWh·d <sup>-1</sup>		496	496	496	496	496
ÍNDEX DE COST OPERACIONAL (OCI)			adimensional		5993	5992	5992	5992	5992
<b>TERMES D'ACOMPLIMENT AMBIENTAL</b>									
ÍNDEX DE QUALITAT DE L'EFLUENT			kg unitats de contaminant ·d <sup>-1</sup>		823	824	823	824	823
<b>N TOTAL</b>									
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (18 mg N·L <sup>-1</sup> )			%		4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS					1	1	1	1	1
<b>AMONI</b>									
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (4 mg N·L <sup>-1</sup> )			%		9,5	9,5	9,5	9,5	9,5
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS					2	2	1	1	2
<b>TSS</b>									
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERATS EL LÍMITS (30 mgTSS·L <sup>-1</sup> )			%		0	0	0	0	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS					0	0	0	0	0
<b>COD</b>									
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERATS EL LÍMITS (100 mgCOD·L <sup>-1</sup> )			%		0	0	0	0	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS					0	0	0	0	0
<b>BOD5</b>									
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (10 mg·L <sup>-1</sup> )			%		0	0	0	0	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS					0	0	0	0	0

Taula A1.11: Resultats del model per a les simulacions utilitzant sistema PI en cascada i per a diferents *set-points* d'amoní.

RESULTATS DEL MODEL PER A DIFERENTS SIMULACIONS											
CONTROL PI EN CASCADA PER A DIFERENTS SET-POINTS D'AMONI											
TERMES DE COSTOS		set-point 2	set-point 2,5	set-point 3	set-point 3,5	set-point 4	set-point 4,5	set-point 5	set-point 5,5	set-point 6	set-point 6,5
UNITATS											
MITJANA DE PRODUCCIÓ DE FANGS PER DIA	kgTSS·d <sup>-1</sup>	1160	1160	1160	1160	1160	1160	1143	1143	1160	1160
MITJANA ENERGIA D'AERACIÓ	kWh·d <sup>-1</sup>	872	848	832	820	811	803	787	787	785	780
MITJANA ENERGIA DE BOMBAMENT	kWh·d <sup>-1</sup>	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
MITJANA ENERGIA DE MESCLA	kWh·d <sup>-1</sup>	435	437	438	440	442	444	445	445	450	453
ÍNDEX DE COST OPERACIONAL (OCI)	adimensional	7089	7066	7050	7038	7028	7020	6920	6920	7001	6995
<b>TERMES D'ACOMPLIMENT AMBIENTAL</b>											
ÍNDEX DE QUALITAT DE L'EFLUENT	kg unitats de contaminant ·d <sup>-1</sup>	844	895	949	1005	1062	1120	1181	1181	1297	1356
<b>N TOTAL</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (18 mg N·L <sup>-1</sup> )	%	4,2	4	3,9	3,8	3,7	3,7	7,9	3,7	3,7	3,7
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS		3	4	4	4	4	4	5	5	5	5
<b>AMONI</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (4 mg N·L <sup>-1</sup> )	%	0	0	0,05	0,33	0,47	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS		0	0	1	2	2	1	1	1	1	1
<b>TSS</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERATS EL LÍMITS (30 mgTSS·L <sup>-1</sup> )	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>COD</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERATS EL LÍMITS (100 mgCOD·L <sup>-1</sup> )	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>BOD5</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (10 mg·L <sup>-1</sup> )	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Taula A1.12: Resultats del model utilitzant sistema PI en cascada amb adaptació en continu dels *set-points* d'amoni segons sistema tarifari.

RESULTATS DEL MODEL PER A DIFERENTS SIMULACIONS			VEURE DIFERENTS COMBINACIONS A Taula 4.28 CAPÍTOL 4								
CONTROL PI EN CASCADA AMB ADAPTACIÓ EN CONTINU DELS SET-POINTS D'AMONI SEGONS			COMBINACIÓ	COMBINACIÓ	COMBINACIÓ	COMBINACIÓ	COMBINACIÓ	COMBINACIÓ	COMBINACIÓ	COMBINACIÓ	COMBINACIÓ
TERMES DE COSTOS	SISTEMA TARIFARI EDAR	UNITATS	1	2	3	4	5	6	7	8	9
MITJANA DE PRODUCCIÓ DE FANGS PER DIA		kgTSS·d <sup>-1</sup>	1136	1139	1139	1139	1139	1139	1139	1140	1140
MITJANA ENERGIA D'AERACIÓ		kWh·d <sup>-1</sup>	750	720	704	692	683	676	670	665	661
MITJANA ENERGIA DE BOMBAMENT		kWh·d <sup>-1</sup>	140	140	140	140	140	140	140	140	140
MITJANA ENERGIA DE MESCLA		kWh·d <sup>-1</sup>	476	478	483	486	491	493	498	502	504
ÍNDEX DE COST OPERACIONAL (OCI)		adimensional	6037	6009	5994	5982	5973	5966	5960	5955	5950
<b>TERMES D'ACOMPLIMENT AMBIENTAL</b>											
ÍNDEX DE QUALITAT DE L'EFLUENT		kg unitats de contaminant · d <sup>-1</sup>	630	672	718	766	815	864	914	965	1016
<b>N TOTAL</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (18 mg N·L <sup>-1</sup> )		%	3,1	2,7	2,4	2,2	2,1	2	1,9	1,9	1,9
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			3	3	4	3	3	3	2	2	2
<b>AMONI</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (4 mg N·L <sup>-1</sup> )		%	0	0	0,1	0,3	0,2	0,7	0,9	0,9	0,9
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			0	0	1	1	2	4	11	1	1
<b>TSS</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERATS EL LÍMITS (30 mgTSS·L <sup>-1</sup> )		%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>COD</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERATS EL LÍMITS (100 mgCOD·L <sup>-1</sup> )		%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>BOD5</b>											
% DE TEMPS AVALUAT EN QUE S'HAN SUPERAT ELS LÍMITS (10 mg·L <sup>-1</sup> )		%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NOMBRE DE VEGADES EN QUE S'HAN SOBREPASSAT EL LÍMITS			0	0	0	0	0	0	0	0	0