



Universitat de Girona

ESTUDI DEL COMPORTAMENT DE SISTEMES BIOLÒGICS DE DEPURACIÓ D'AIGÜES RESIDUALS MITJANÇANT MODELS MECANÍSTICS, OPTIMITZANT LA INFORMACIÓ DISPONIBLE DE LES DADES OBTINGUDES EN LÍNIA

Jesús COLPRIM GALCERAN

Dipòsit legal: Gi. 1808-2012

<http://hdl.handle.net/10803/96473>

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.



Universitat de Girona



DEPARTAMENT D'ENGINYERIA QUÍMICA AGRÀRIA I TECNOLOGIES
AGROALIMENTÀRIES

LABORATORI D'ENGINYERIA QUÍMICA I AMBIENTAL

**ESTUDI DEL COMPORTAMENT DE SISTEMES
BIOLÒGICS DE DEPURACIÓ D'AIGÜES
RESIDUALS MITJANÇANT MODELS
MECANÍSTICS, OPTIMITZANT LA INFORMACIÓ
DISPONIBLE DE LES DADES OBTINGUDES EN
LÍNIA.**

Memòria que per optar al grau de Doctor Enginyer Industrial presenta

JESÚS COLPRIM GALCERAN

Girona, Juny de 1998

MANEL POCH ESPALLARGAS, catedràtic d'Enginyeria Química de la Universitat de Girona, i MIQUEL RIGOLA LAPEÑA, professor titular d'Enginyeria Química de la Universitat de Girona.

CERTIFIQUEN:

Que el llicenciat Jesús Colprim Galceran ha dut a terme, sota la seva direcció, el treball que, amb el títol "*ESTUDI DEL COMPORTAMENT DE SISTEMES BIOLÒGICS DE DEPURACIÓ D'AIGÜES RESIDUALS MITJANÇANT MODELS MECANÍSTICS, OPTIMITZANT LA INFORMACIÓ DISPONIBLE DE LES DADES OBTINGUDES EN LÍNIA*", presenta en aquesta memòria, la qual constitueix la seva Tesi per a optar al Grau de Doctor Enginyer Industrial dins del programa de doctorat Tecnologies del Medi Ambient de la Universitat de Girona.

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

Girona, 1 de Juny de 1998.

Manel Poch Espallargas

Miquel Rigola Lapeña

*Í*ND*E*X

0. ÍNDIX

| | |
|---|-----------|
| 0. Índex | 3 |
| 1. Objectius | 9 |
| 2. Introducció. | 13 |
| 3. Modelització i simulació. | 19 |
| 3.1 Introducció. | 19 |
| 3.1.1 Sistema i Model. | 19 |
| 3.1.2 Experiència - Simulació. | 20 |
| 3.1.3 Desenvolupament d'un model. Modelització. | 21 |
| 3.1.4 Experimentació amb models: Simulació. | 23 |
| 3.2 Modelització de EDARs. | 25 |
| 3.2.1 Modelització del reactor biològic | 26 |
| 3.2.2 Modelització dels decantadors primaris i secundaris | 29 |
| 3.2.3 Models de EDARs | 33 |
| 3.3 Simulació de EDARs. | 33 |
| 3.3.1 SSSP, Single Sludge Simulation Program. | 34 |
| 3.3.2 GPS-X. Una eina de simulació. | 34 |
| 3.3.2.1 Variables d'estat i llibreries disponibles. | 37 |
| 3.3.2.2 Models d'influent | 41 |
| 3.3.2.3 Models de llots actius. | 43 |
| 3.3.2.3.1 IAWPRC - ASM1. | 44 |
| 3.3.2.3.2 Model Mantis. | 45 |
| 3.3.2.3.3 Model reduït. | 47 |
| 3.3.2.3.4 NRMantis. | 47 |
| 3.3.2.3.5 Model general. | 47 |
| 3.3.2.3.6 Model ASM2. | 49 |
| 3.3.2.3.7 Models NRGeneral i NRASM2. | 52 |
| 3.3.2.3.8 Models de digestió anaeròbia. | 52 |
| 3.3.2.4 Models de sedimentació i flotació. | 52 |
| 3.3.2.4.1 Model Point. | 53 |
| 3.3.2.4.2 Model Simple1d. | 53 |
| 3.3.2.4.3 Noreac1d. | 53 |
| 3.3.2.4.4 Mantis1d, Gener2d i ASM21d. | 54 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3.2.4.5 Sim2d, Gen2d i ASM22d | 54 |
| 3.3.2.5 Altres models | 54 |
| 3.3.3 Prestacions del GPS-X | 54 |
| 3.3.3.1 Estat estacionari | 55 |
| 3.3.3.2 Anàlisi de sensibilitat | 55 |
| 3.3.3.3 Simulacions dinàmiques | 55 |
| 3.3.3.4 Calibració del model | 56 |
| 4. Utilització de la simulació per a l'ampliació d'una EDAR. Eliminació de nitrogen en una indústria alimentària. | 59 |
| 4.1 Descripció de l'EDAR. | 59 |
| 4.2 Situació actual. | 60 |
| 4.2.1 Característiques de l'aigua residual | 60 |
| 4.2.2 Condicions d'operació | 60 |
| 4.3 Objectiu de les simulacions. | 61 |
| 4.4 Modelització de la planta. | 61 |
| 4.5 Calibració. | 62 |
| 4.6 Simulacions. | 63 |
| 4.6.1 Utilització de les instal·lacions actuals | 64 |
| 4.6.2 Modificació de la EDAR. Ampliació | 66 |
| 5. Ampliació d'una EDAR. Llorenç del Penedès. | 73 |
| 5.1 Descripció de l'EDAR. | 73 |
| 5.2 Situació actual. | 73 |
| 5.2.1 Característiques de l'aigua residual | 74 |
| 5.2.2 Condicions d'operació | 75 |
| 5.3 Objectiu de les simulacions. | 76 |
| 5.4 Modelització de la planta. | 76 |
| 5.5 Calibració. | 76 |
| 5.6 Proposta A. Funcionament evitant la nitrificació. | 77 |
| 5.6.1.1 Condicions de la simulació | 78 |
| 5.6.1.2 Resultats de la simulació de la proposta A | 78 |
| 5.7 Proposta B. A partir de les modificacions de la proposta A: avaluar les possibilitats de N/D. | 81 |

| | |
|---|------------|
| 5.7.1.1 Simulació de la temporització de turbines. | 83 |
| 5.7.1.2 Càlcul del volum necessari per a N/D. | 85 |
| 6. Ourense. N/D no assolida en plantes dissenyades per a fer-ho. | 91 |
| 6.1 Descripció de l'EDAR. | 91 |
| 6.2 Situació actual. | 92 |
| 6.2.1 Característiques de l'aigua residual. | 93 |
| 6.2.2 Condicions d'operació. | 95 |
| 6.2.3 Dades analítiques. | 96 |
| 6.2.3.1 Entrada mitjana | 96 |
| 6.2.3.2 Altres punts del procés | 98 |
| 6.3 Objectiu de les simulacions. | 99 |
| 6.4 Modelització de la planta. | 99 |
| 6.4.1.1 Decantació primària | 100 |
| 6.4.1.2 Reactors biològics | 100 |
| 6.4.1.3 Llibreria utilitzada. Models | 101 |
| 6.5 Calibració del model. | 102 |
| 6.5.1 Condicions de la calibració. | 102 |
| 7. Anàlisi de les capacitats de tractament. EDAR de Tarragona. | 105 |
| 7.1 Descripció de l'EDAR. | 105 |
| 7.2 Situació Actual. | 106 |
| 7.2.1 Característiques de l'aigua residual. | 106 |
| 7.2.2 Condicions d'operació. | 107 |
| 7.3 Objectiu de les simulacions. | 108 |
| 7.4 Modelització de la planta. | 108 |
| 7.5 Calibració | 109 |
| 7.5.1 Paràmetres cinètics i estequiomètrics. | 110 |
| 7.6 Simulacions efectuades | 112 |
| 7.6.1 Anàlisi de sensibilitat del cabal d'entrada. | 112 |
| 7.6.2 24500 m ³ /dia de cabal normal + 1000 m ³ /dia d'aigua de poligons. | 114 |
| 7.6.3 26000 m ³ /dia de cabal normal + 2500 m ³ /dia d'aigua de poligons. | 115 |
| 7.6.4 32000 m ³ /dia de cabal normal + 2000 m ³ /dia d'aigua de poligons. | 116 |
| 8. Wavelets. Una tècnica de filtrat de senyals. | 121 |

| | |
|---|------------|
| 1.1 Introducció. Orígens i definicions | 121 |
| 1.1.1 La noció d'escala. | 122 |
| 8.1 Filtrat de senyals. | 124 |
| 8.1.1 Filtre d'escala-espai. | 126 |
| 8.2 Filtrat de senyals amb wavelets. | 128 |
| 8.2.1 Definició de les Wavelets. | 129 |
| 8.2.2 Discretització dels paràmetre de dilatació (s) i translació (u). | 130 |
| 8.2.3 Tipus de Wavelets | 130 |
| 8.2.3.1 Splines | 131 |
| 8.2.3.2 Daubechies | 132 |
| 8.2.3.3 Maxflat | 133 |
| 8.2.3.4 Symlets | 134 |
| 8.2.4 Transformada de wavelet. Base de filtrat. | 134 |
| 8.2.4.1 Necessitats i condicions per efectuar un filtrat amb wavelets. | 136 |
| 8.2.4.2 Càlcul de la transformada de wavelet. Exemple. | 137 |
| 8.2.5 Anàlisi multiescalar de dades discretes. | 140 |
| 8.2.6 Eliminació de característiques. Esmorteïment de senyals. | 141 |
| 8.2.6.1 Algorismes d'elecció automàtica de la Base. | 146 |
| 8.3 Resultats. Aplicació del filtrat amb wavelets. | 148 |
| 8.3.1 Aplicació de les wavelets a una Respirometria. | 148 |
| 8.3.1.1 Característiques de les dades. | 149 |
| 8.3.1.2 Anàlisi multiescalar. | 150 |
| 8.3.1.3 Eliminació de coeficients. Selecció automàtica de la base. | 153 |
| 8.3.1.4 Comparació de metodologies. | 157 |
| 8.3.2 Aplicació de les wavelets a les dades obtingudes en línia en la depuradora d'aigües residuals de Tarragona. | 158 |
| 8.3.2.1 Característiques de les dades | 159 |
| 8.3.2.2 Anàlisi multiescalar. | 162 |
| 9. Conclusions. | 179 |
| 10. Bibliografia | 185 |

OBJECTIUS

1. OBJECTIUS

La present tesi es planteja els següents objectius:

- ✓ Revisió dels model mecanístics de depuració d'aigües residuals.
- ✓ Avaluar-ne la fiabilitat en la simulació d'estacions depuradores d'aigües residuals.
- ✓ Estudiar la problemàtica de disposar de gran quantitat de dades disponibles
- ✓ Presentar una nova tècnica de filtrat de dades, les Wavelets.
- ✓ Avaluar la capacitat de filtrat de les wavelets en les dades disponibles en línia de la depuradora de Tarragona.

La tasca realitzada s'engloba dins de les línies de recerca del Laboratori d'Enginyeria Química i Ambiental (Lequia) de la Universitat de Girona encaminades cap a la millora de la gestió i fiabilitat de les estacions depuradores d'aigües residuals.

INTRODUCCIÓ

2. INTRODUCCIÓ.

El fet de viure en un món en estat no estacionari, es dir, que qualsevol situació no es pot mantenir constant al llarg del temps, ve explicat en part per la segona llei de la termodinàmica. Aquesta ens diu que qualsevol sistema no controlat (o sense cap mena d'intervenció) tendeix de forma natural a incrementar el seu grau de desordre, o el que és el mateix, la seva entropia.

Tot i que de fet ens és pràcticament impossible evitar aquesta inexorable llei, es poden prendre mesures que poden reduir en part aquest fatídic destí. Bàsicament disposem de dues eines que ens serveixen per a tal efecte. Ambdues es basen en el coneixement de que disposem del sistema que volem mantenir sota unes condicions estables. El primer seria fer un seguiment del comportament del sistema monitoritzant la seva situació i actuant en un futur proper per tal d'ajustar el seu comportament. Serien les tècniques basades en un estudi estadístic del comportament del sistema conegudes en general com a Control Estadístic de Processos (Statistical Process Control -SPC-). L'altre mètode es basaria en el control on-line de les variables pròpies del sistema a les que fixariem un valor predeterminat o punt de consigna (set-point). L'ajust del sistema es faria de forma automàtica per diferents mecanismes de control de processos com podria ésser per exemple l'ampliament conegut i aplicat sistema de control retroalimentat o feed-forward. Estaríem parlant en aquest cas del control de processos per mètodes enginyerils (Engineering Process Control -EPC-).

L'utilització de mètodes estadístics (SPC) ó enginyerils (EPC) ens vindrà determinada en funció de la facilitat o dificultat d'obtenir valors de l'estat del procés en una freqüència o període de temps més o menys llarg i del possible retard respecte al valor real del sistema que obtenim. En tan el SPC és aplicable en principi a qualsevol sistema, l'ús d'eines de EPC ens vindrà limitat bàsicament en la possibilitat de poder conèixer de forma més o menys continuada el valor de les variables a seguir i a mantenir constants.

Si prenem com a punt de referència el sistema de depuració d'aigües residuals per el mètode de llots actius, tenim bàsicament un procés amb unes entrades i sortides definides. Com a variables d'entrada podríem definir la quantitat i qualitat de l'aigua a depurar, en tant que com a variables de sortida serien les referides a la qualitat de l'aigua depurada i els residus generats durant el procés (purga o excés de fangs generats, ...). Aquestes serien les variables pròpies del procés de depuració, tot i que per tal de mantenir les condicions dels procés apareixen altres variables que podríem manipular a fi i efecte de mantenir el procés de depuració sota unes condicions més o menys controlades, les variables d'operació (cabals de recirculació, purgues, set-points d'oxigen, ...).

El comportament del sistema de depuració de fangs actius ha estat objecte d'estudi durant molt de temps, així en l'actualitat es coneix amb prou certesa quins són els mecanismes bàsics que regeixen el procés de depuració. El fonament dels sistemes de depuració biològica es basen en la capacitat de certs microorganismes de degradar la matèria orgànica a CO_2 i aigua per al seu propi manteniment, creixement i reproducció. També es coneix l'existència de dues grans famílies de microorganismes capaços de treballar en condicions diferenciades (organismes autotròfics i heterotròfics). Els autotròfics utilitzen com a font d'energia l'oxigen present en l'aigua i com a font de carboni la matèria orgànica present en l'aigua residual. Els autotròfics tenen la capacitat d'obtenir l'energia necessària per a viure del l'oxidació de les possibles formes del nitrogen (nitrats o nitrits) i com a font de carboni el CO_2 dissolt en l'aigua. La combinació d'aquests microorganismes permet en l'actualitat desenvolupar sistemes de depuració amb diferents situacions que permeten l'eliminació de la matèria orgànica i el nitrogen. Un altre element necessari per als microorganismes és el fòsfor i en l'actualitat també s'aconsegueix eliminar-lo a partir de la capacitat de certs microorganismes (microorganismes heterotròfics coneguts com acumuladors de fosfats o organismes Poly-P) d'acumular el poli-fosfat en el seu interior.

La descripció matemàtica dels diferents processos que tenen lloc en el procés de llots actius es pot veure reflexada en el Model N° 1 aparegut el 1995. En aquest model es pretenia descriure de forma compacte els principals processos que podrien tenir lloc en el procés de depuració per fangs actius. El Model N° 1 és

limita a descriure de forma matemàtica els processos d'eliminació de matèria orgànica i nitrogen. Les necessitats d'eliminar també el fòsfor de l'aigua residual va comportar que apareixes una nova versió d'aquest on s'incloua l'eliminació biològica de fòsfor, el Model N° 2. Tant l'un com l'altre han estat provats com a models capaços de descriure amb prou realitat el que succeeix en el procés de depuració biològica de les aigües residuals.

El fet de disposar de models matemàtics que ens descriuen el comportament d'un sistema no soluciona la capacitat de poder mantenir un procés sota unes condicions controlades si bé és un pas endavant per a tal fita. Això sí, són una eina molt útil per tal d'aconseguir-ho i per obtenir possibles comportaments de la planta davant de certes situacions conegudes o esperades en un futur. Bàsicament el problema que ens trobarem en una estació depuradora d'aigües residuals (EDAR), serà el de no poder mantenir el procés sota unes condicions controlades ja que no som capaços de conèixer en cada instant quines són les condicions en que aquest es troba.

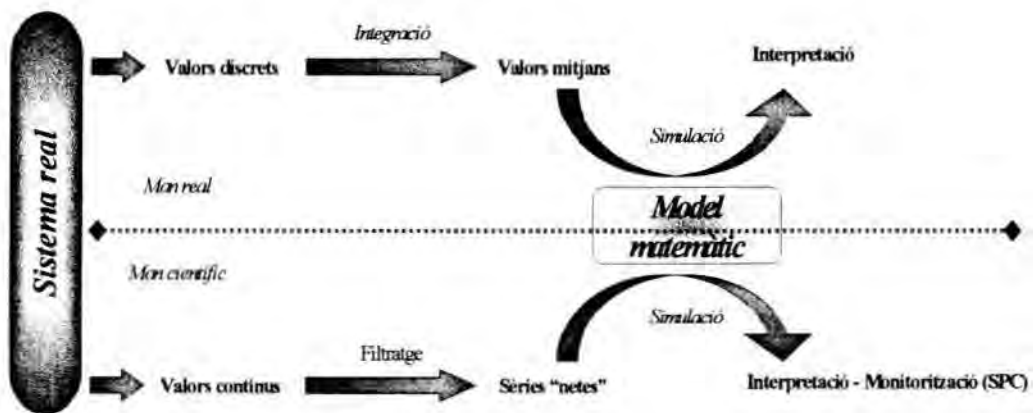


Figura 2.1. Paral·lelismes entre el món científic i el món real.

La possibilitat de conèixer en cada instant les variables d'entrada en un sistema ens limitarà la capacitat de poder-lo controlar de forma automàtica. En l'actualitat, els models matemàtics disponibles en el procés de llots actius es basen en una sèrie de variables difícils de mesurar per no dir fins i tot abstractes. El cost que representa l'instal·lació de processos d'anàlisi en les EDARs fa que en l'actualitat tan sols es disposi de valors puntuals mesurats cada cert període de temps (diaris, setmanals,...). Tot i que cada cop més el seguiment analític de les EDARs es pren

com una eina important per al coneixement de la seva situació, en la major part de les depuradores actuals es disposa tant sols de valors discrets o puntuals.

A partir de valors discrets de la planta es pot procedir a la seva integració per tal d'obtenir valors mitjans que puguin descriure'n la situació. Una de les eines importants de que es pot disposar per a conèixer millor la planta i els seus possibles comportaments és la simulació de la depuradora. Amb la simulació podrem obtenir i optimitzar les condicions en que hauria de treballar la EDAR per tal d'assolir uns criteris prefixats a priori.

Ara bé, cada dia apareixen en el mercat noves tècniques i instruments que ens permeten la mesura de les variables del sistema d'una forma més automàtica i ràpida. L'aplicació d'aquestes noves tècniques instrumentals conclou amb l'obtenció de sèries de dades més o menys continuades que impliquen una gran quantitat d'informació. Però no tot son avantatges, l'adquisició de dades en línia inclou també l'adquisició de tots els errors (sorolls de fons, errors de l'aparell, ...). L'ús d'aquestes dades per a l'aplicació de controls enginyerils comporta certs riscos. És necessari aplicar algun mètode de filtrat de senyals per tal de poder utilitzar-les amb prou seguretat. Una de les noves tècniques de filtrat de senyals de que es disposa és l'ús de les Wavelets ó funcions d'ona. Amb les dades filtrades o netes les possibilitats d'aplicar un control més fiable de la planta augmenten. Paral·lelament, les possibles situacions de la planta podrien ser simulades i obtenir-ne valors més reals que no pas amb l'ús de valors discrets. I no només simulacions podríem efectuar, tècniques de monitorització com el SPC podrien aplicar-se amb més seguretat.

En aquesta tesi, es presenten varis capítols en els que es descriu:

- com l'ús de la simulació ens pot ajudar a obtenir o optimitzar les condicions d'operació de la EDAR,
- la descripció d'una nova tècniques de filtrat de senyals amb wavelets.

_____ *MODELITZACIÓ I SIMULACIÓ*

3. MODELITZACIÓ I SIMULACIÓ.

3.1 INTRODUCCIÓ.

Sovint parlant de modelització apareixen termes tal com sistema, experiència, model o simulació. Cal abans que res, definir una sèrie de conceptes que ens permetin parlar en propietat dels conceptes de modelització.

3.1.1 Sistema i Model.

Entenem com a **sistema** a un grup d'elements connectats i organitzats entre ells de forma que delimiten una zona concreta. Un dels aspectes bàsics del sistema és que pot ésser observat i en certs aspectes controlat.

Una vegada definits els límits del sistema, aquest no deixa de formar part del seu **entorn**. Aquesta participació del sistema en el seu entorn provoca que s'estableixin una sèrie de relacions entorn – sistema - entorn que afecten directament al comportament del nostre sistema. Les variables de l'entorn que afecten al comportament del sistema els anomenarem **entrades**, en tant que les variables del sistema que afecten al seu entorn **sortides**.

Un **model** és una descripció dels processos que poden tenir lloc al sistema. Existeixen diferents tipus de models i la seva classificació es pot descriure per parelles tal com:

Models lingüístics - Models matemàtics

Models mecànics - Models de caixa negra

Models dinàmics - Models d'estat estacionari.

Models lingüístics - matemàtics. Els models lingüístics són aquells que descriuen l'estat del sistema mitjançant l'ús de la paraula. Són útils per a l'adquisició de coneixement heurístic del sistema i són la base de la majoria dels sistemes experts o basats en el coneixement. Els models matemàtics són aquells

que utilitzen equacions matemàtiques per a la descripció de les possibles interaccions entre els processos que tenen lloc en el sistema.

Models mecanístics - caixa negra. Un model mecanístic és aquell que intenta descriure i donar explicació als diferents processos que tenen lloc dins del sistema. Serien models com ara els que descriuen cinètiques de creixement, reaccions químiques, processos de transferència, bescanvi, ... L'ús de models mecanístics està supeditat al coneixement dels diferents processos que poden tenir lloc en el sistema i si res més no, en una etapa inicial poden intentar descriure'ls. A diferència dels models mecanístics, els de caixa negra no tenen en compte per res el que està passant en l'interior del sistema. Els models de caixa negra prenen el sistema com a una unitat indivisible en la que tan sols tenen importància les entrades i les sortides. En cap cas intenten caracteritzar els mecanismes que fan que el sistema tingui una resposta (sortides) davant dels estímuls del seu entorn (entrades). El model de caixa negra més senzill seria intentar fer una aproximació polinòmica de les entrades en front de les sortides.

Models dinàmics - d'estat estacionari. Els sistemes solen presentar en general una variació amb el temps. Els models d'estat estacionari son aquells que no tenen en compte aquesta variació temporal i consideren que les variables del sistema no varien amb el temps. Serien models d'estat estacionari, per exemple, les equacions de disseny d'una EDAR. En les equacions de disseny es sol considerar que totes les variables del sistema es mantenen constants al llarg del temps. Els models dinàmics en canvi intenten interpretar quina és la variació temporal de les variables del sistema. Son models necessaris per a la descripció de l'evolució del sistema amb el temps, sobretot si les entrades presenten també una variació temporal. Un dels aspectes més important dels models dinàmics es que ens poden ensenyar quina és la transició temporal des de un estat estacionari fins a un altre.

3.1.2 Experiència - Simulació.

Una **experiència** o experiment és l'observació de les entrades i sortides del sistema durant un període de temps finit. Es poden efectuar experimentacions

modificant les entrades del sistema i així augmentar el coneixement del nostre sistema observant com es veuen afectades les sortides. Les experimentacions són bàsiques per a l'obtenció d'un model prou bo com per a descriure les respostes del sistema davant de certes entrades.

Les **simulacions** són experiències aplicades sobre un model. Es a dir, simulació és a model, el que experimentació és a sistema. Amb les simulacions el que aconseguim és obtenir l'informació de les possibles respostes del sistema a les seves entrades sense necessitat d'efectuar experimentacions. Aquesta és una de les grans utilitats de les simulacions, adquirir el coneixement del comportament del sistema sense efectuar cap canvi sobre ell. La fiabilitat dels coneixements adquirits per simulació dependrà bàsicament de la bona representació del sistema que pot fer el model i de la capacitat que tinguem de definir-ne les seves entrades.

3.1.3 Desenvolupament d'un model. Modelització.

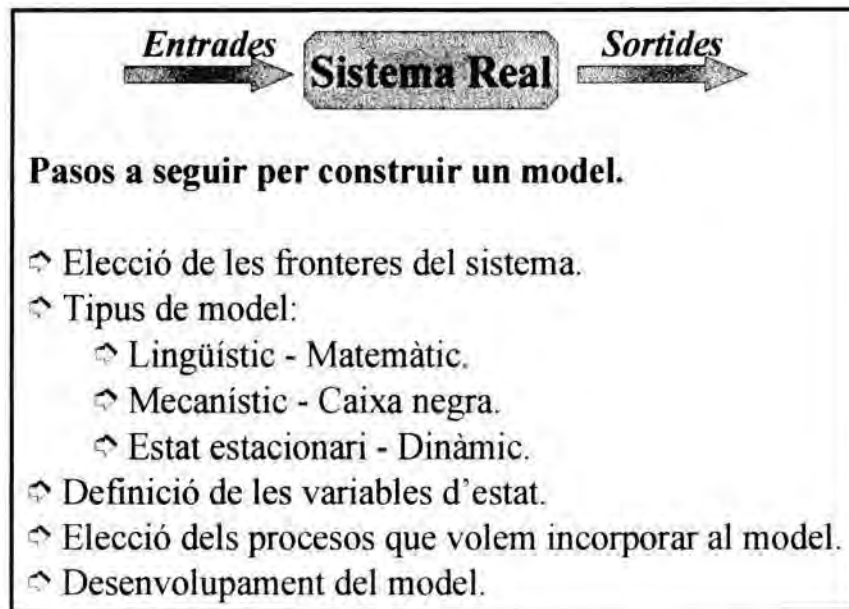


Figura 3.1: Processos a seguir per a la modelització.

A l'hora de desenvolupar un model per a un sistema cal plantejar-se una sèrie de preguntes inicials:

- Quin sistema volem modelitzar? Quines són les fronteres del nostre sistema?
- De quin coneixement del sistema disposem? Quin tipus de model volem?
- Quines variables del sistema volem modelitzar? Variables d'estat.

La definició de les fronteres del nostre sistema és el primer pas per a l'elaboració del model d'un sistema. L'establiment de les fronteres del nostre model ens limitarà les futures simulacions a l'estudi de les evolucions del que està passant a l'interior del nostre sistema, en cap cas podrem conèixer com evoluciona una variable fora dels límits del nostre sistema.

El coneixement disponible sobre els processos que tenen lloc en el sistema és indispensable a l'hora d'escollir el tipus de model per al nostre sistema. La utilització d'un model mecanístic voldrà dir que necessitarem conèixer quins processos tenen lloc en el nostre sistema. Tot i així, es poden utilitzar models mecanístics per a la validació d'un comportament o mecanisme observat en un sistema. Paral·lelament amb un model de caixa negra, el que es pretén és establir una correlació entre les variables que afecten al nostre sistema i les seves respostes.

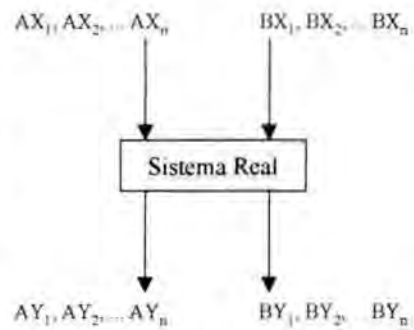
Un cop definides les fronteres del sistema i el tipus de model que volem desenvolupar caldrà escollir quines variables del sistema volem modelitzar, les **variables d'estat**. Les variables d'estat han de ser susceptibles de ser observades o mesurades dins del nostre sistema. De vegades però, no es necessari observar de forma directa la variable d'estat; a fi i efecte d'obtenir models acurats es poden establir relacions entre els paràmetres mesurats directament i les variables d'estat definides en el nostre sistema. Per exemple, en els processos de depuració per llots actius es pot assimilar la quantitat de microorganismes presents en el reactor biològic a la quantitat de sòlids en suspensió volàtils del nostre sistema.

Definides les variables d'estat i el tipus de model procedirem al seu desenvolupament. Una de les propietats d'un bon model és la capacitat que tingui

a representar altres sistemes semblants a ell. Així per exemple, és preferible un model capaç de descriure el comportament de qualsevol Estació Depuradora d'Aigües Residuals (EDAR) a un model específic per a una depuradora concreta i que no pot aplicar-se a qualsevol altre. La capacitat de poder definir models generals a sistemes semblants ve donada per la presència dels **paràmetres** o constants del model.

3.1.4 Experimentació amb models: Simulació.

Un cop definit el model, amb les variables d'estat i els paràmetres corresponents, podem procedir a efectuar-ne les simulacions desitjades. Cal però, seguir un procediment previ per tal d'assegurar-nos que els resultats que n'obtinguem siguin el més semblants possibles al sistema que intentem representar.



El primer pas és la identificació dels paràmetres del model que ajusten les variables d'estat del model a les del sistema, la **calibració**. Els models es calibren a partir dels valors obtinguts experimentalment del nostre sistema. Així ajustarem els valors del paràmetres del model a fi i efecte de que els resultats obtinguts per el model siguin el més semblants possibles als valors obtinguts experimentalment.

Calibració del model

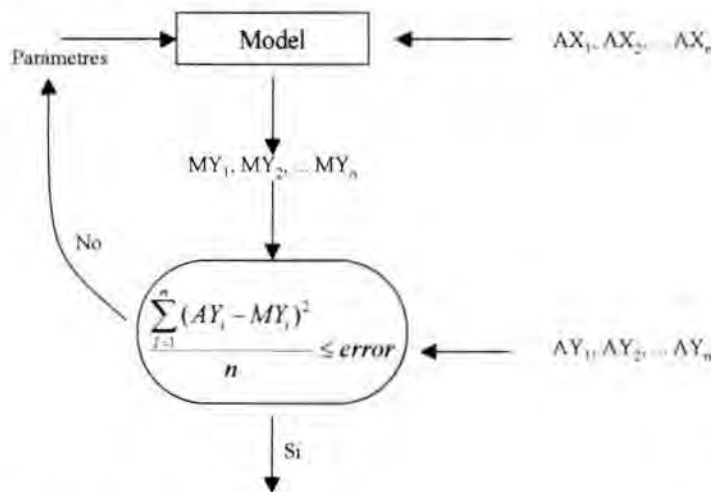


Figura 3.2: Diagrama de la calibració d'un model

En la figura 3.2 es mostra el procés iteratiu a seguir per a la calibració d'un model. A partir de les variables d'entrada AX_1, AX_2, \dots, AX_n , i una primera suposició dels paràmetres del model, es calcula el valor que prenen les variables d'estat del model MY_1, MY_2, \dots, MY_n . La bondat de l'ajust dels paràmetres del model es calcula a partir de la mitjana aritmètica de les diferències quadrades entre els valors obtinguts a partir del model i els obtinguts experimentalment (AY_1, AY_2, \dots, AY_n). Si el valor calcular és superior a un error establert, es procedeix a la modificació dels paràmetres del model i es torna a començar.

Un cop calibrat el model, i abans de procedir-ne a efectuar simulacions, cal verificar que els paràmetres obtinguts en el procés de calibració són capaços de representar qualsevol altre situació del sistema, la **validació**. La validació d'un model la realitzarem a partir de dades experimentals diferents de les utilitzades per a la calibració. Consisteix en introduir al model els paràmetres obtinguts en el procés de calibració i les entrades reals d'una segona experiència. Els resultats obtinguts del model es compararan amb els experimentals i si aquests s'ajusten prou bé podrem donar el sistema per validat.

Validació del model

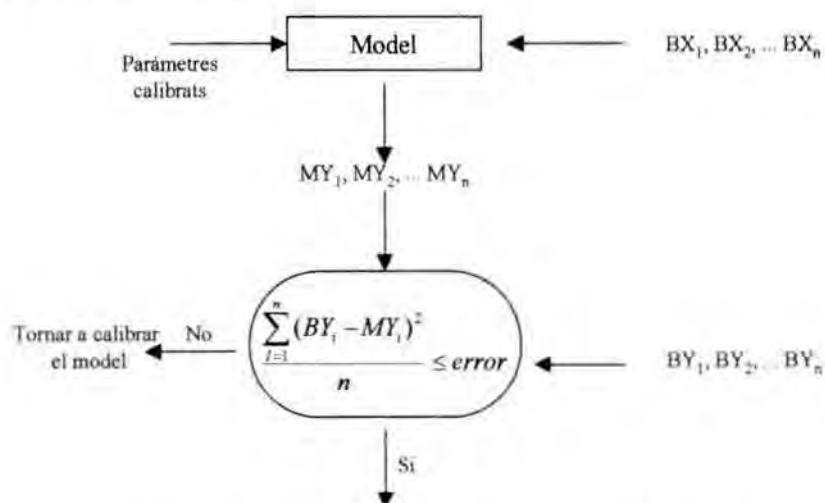


Figura 3.3: Diagrama de la validació d'un model

Un cop calibrat i validat el model, es poden efectuar les simulacions de les situacions desitjades per tal d'augmentar el coneixement del comportament del nostre sistema.

3.2 MODELITZACIÓ DE EDARS.

En la modelització de estacions depuradores d'aigües residuals els límits del sistema vindran definits en funció de quines operacions bàsiques volem modelitzar. En el nostre cas en limitarem a la modelització de la línia d'aigua, és a dir, decantació primària, tractament biològic i decantació secundària.

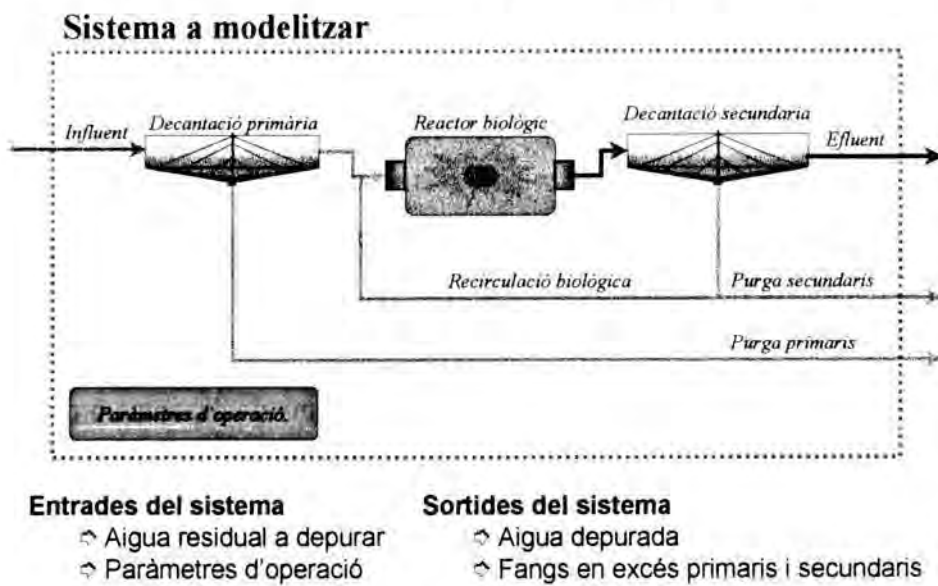


Figura 3.4: Diagrama del procés a modelitzar en una EDAR

Els límits físics del nostre sistema queden doncs ben definits. Les entrades, pertorbacions de l'exterior que afecten al comportament del sistema, seran la quantitat i la qualitat de l'aigua a depurar així com totes aquelles possibles actuacions dins del diagrama de procés.

Els estudis dels darrers anys han permès obtenir diferents equacions matemàtiques que ens descriuen els diferents processos que tenen lloc en les operacions unitàries del nostre sistema. Això fa que escollim un model matemàtic en front d'un model lingüístic. Aquest coneixement també ens portarà a escollir un model mecanístic en front del de caixa negra, tot i que l'elecció d'un model mecanístic bé més encaminada a donar una explicació real a les sortides del sistema respecte a les seves entrades. Finalment, prendrem un model dinàmic donat el caràcter no

estacionari de les entrades al sistema que fan que aquest no es trobi en estat estacionari.

En l'actualitat existeixen gran quantitat de model matemàtics que ens permet modelar amb prou fidelitat el comportament de cadascuna de les unitats del nostre sistema. Així disposem de models per a la decantació o separació de sòlids i per al tractament biològic d'aigües residuals.

3.2.1 Modelització del reactor biològic

Per a la modelització dels sistemes de depuració basats en els llots actius, es sol presentar el model en forma de matriu, la matriu de Peterson. Si prenem com a exemple un sistema biològic senzill format per un únic reactor biològic (figura 3.4), i desenvolupem un model bàsic tindrem:

Consideracions inicials: No tindrem en compte el sistema de decantació primària. La reacció biològica només es considera en el reactor biològic i en el decantador secundari només té lloc el procés de separació de la biomassa

Elecció de les variables d'estat. Les variables d'estat que estudiarem en aquest cas faran referència únicament al substrat soluble (S) i la concentració de biomassa en el reactor biològic.

Processos a modelitzar. Per aquest exemple bàsic considerarem els processos de creixement, mort de la biomassa i consum de substrat per la biomassa. El nombre de processos a modelar serà en total de 3.

◆ Procés nº 1: Creixement de la biomassa.

La velocitat de creixement del microorganismes seguirà una cinètica de Monod segons:

$$V_{\text{creixement}} = \mu \cdot X$$

$$\mu = \mu_{\text{max}} \frac{S}{K_s + S}$$

on, $V_{\text{creixement}}$ velocitat de creixement, $\text{gr} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$

| | |
|---------------|---|
| μ , | velocitat específica de creixement, d^{-1} |
| X , | concentració de biomassa, $gr \cdot m^{-3}$ |
| S , | concentració de substrat, $gr \cdot m^{-3}$ |
| μ_{max} , | velocitat específica màxima de creixement, d^{-1} |
| K_s , | constant de saturació, $gr \cdot m^{-3}$ |

◆ Procés nº 2: Mort de la biomassa.

La biomassa desapareixerà o deixarà de ser activa segons:

$$V_{mort} = K_d \cdot X$$

| | | |
|-----|--------------|--|
| on, | V_{mort} , | velocitat de mort de la biomassa, $gr \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$ |
| | K_d , | constant de mortaldat, d^{-1} |
| | X , | concentració de biomassa, $gr \cdot m^{-3}$ |

◆ Procés nº3: Consum de substrat.

$$V_{consum\ de\ S} = -\frac{1}{Y} \mu \cdot X$$

| | | |
|-----|-----------------------|---|
| on, | $V_{consum\ de\ S}$, | velocitat de consum de substrat, $gr \cdot m^{-3} \cdot d^{-1}$ |
| | Y , | rendiment, gr. biomassa / gr. de substrat consumit |
| | μ , | velocitat específica de creixement, d^{-1} |
| | X , | concentració de biomassa, $gr \cdot m^{-3}$ |

Construcció de les equacions dels balanços de matèria. A partir de la definició del balanç de matèria com: Sortida - Entrada + Acumulació = Generació, per a cadascuna de les variables d'estat s'obté:

Balanç de biomassa:

Sortides: l'efluent, $Q_e \cdot X_e$ i la purga, $Q_w \cdot X_w$

Entrades: l'influent, $Q_i \cdot X_i$

Acumulació: $V \cdot \frac{dX}{dt}$

Generació: $V_{creixement} - V_{mort} = \frac{\mu_{max} \cdot S}{K_s + S} X - K_d \cdot X$

$$[Q_e \cdot X_e + Q_w \cdot X_w] - Q_i \cdot X_i + V \cdot \frac{dX}{dt} = \frac{\mu_{max} \cdot S}{K_s + S} X - K_d \cdot X \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Balanç de substracte:

Sortides: l'efluent, $Q_e \cdot S_e$ i la purga, $Q_w \cdot S_w$

Entrades: l'influent, $Q_i \cdot S_i$

Acumulació: $V \cdot \frac{dS}{dt}$

Generació: $V_{\text{consum de S}} = -\frac{1}{Y} \mu X = -\frac{1}{Y} \frac{\mu_{max} \cdot S}{K_s + S} X$

$$[Q_e \cdot S_e + Q_w \cdot S_w] - Q_i \cdot S_i + V \cdot \frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y} \frac{\mu_{max} \cdot S}{K_s + S} X \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Per a cadascuna de les equacions utilitzades, tenim:

Q_i, Q_w, Q_e Cabals d'entrada, purga i sortida respectivament. El cabal d'entrada fa referència a la sortida del decantador primari.

S_i, S_w, S_e Concentració de substrat a l'entrada, purga i sortida respectivament.

V Volum del reactor biològic.

V_i Velocitat de reacció del procés i .

El sistema d'equacions diferencials format per les equacions 3.1 i 3.2 ens descriu el comportament de les dues variables d'estat escollides en l'interior del nostre sistema. A fi i efecte de simplificar la presentació d'aquestes equacions diferencials, s'utilitza la matriu de Peterson on es separen en forma de taula les variables d'estat (columnes), els processos que es modelitzen (files) i les velocitats de generació.

En la matriu de Peterson només es presenten el terme de generació presents en el balanç de matèria, doncs tant les entrades, les sortides, així com el terme d'acumulació són fàcilment definibles per a cada variable d'estat. Per trobar el terme de generació del balanç de matèria d'una de les variables d'estat ens caldrà

la suma dels productes dels coeficients estequiomètrics per la velocitat de generació de cada procés.

| Processos | Variables d'estat | | Velocitat de reacció |
|------------------------------|-------------------|----------------|---------------------------------------|
| | X | S | |
| Creixement | 1 | $-\frac{1}{Y}$ | $\frac{\mu_{max} \cdot S}{K_s + S} X$ |
| Mort | -1 | - | $K_d X$ |
| Coef. Estequiomètrics | ▼ Biomassa | Substrat | Paràmetres cinètics |
| Y, rendiment | | | μ_{max}, K_s, K_d |

Taula 3.1: Esquema de la matriu de Peterson.

3.2.2 Modelització dels decantadors primaris i secundaris

La decantació és el procés de separació dels sòlids en suspensió de l'aigua per l'efecte de la gravetat. La major part dels models disponibles per a la decantació per gravetat es basen en la teoria del flux de sòlids.

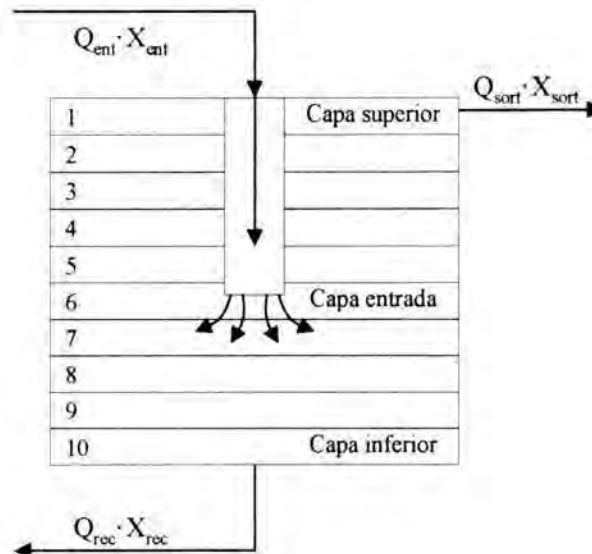


Figura 3.5: Diagrama de capes d'un decantador

La teoria del flux de sòlids parteix de considerar el decantador com a la superposició de diferents capes longitudinals amb el mateix gruix (en general

entre 10 i 50 capes, Figura 3.5). A cada capa s'efectua un balanç de matèria suposant els següents criteris:

1. Els sòlids que entren a la capa es reparteixen de forma uniforme per tota l'àrea de pas de la capa.
2. Només es considera un flux vertical de sòlids (positiu o negatiu).

Per a cada capa es tenen en compte dos fenòmens diferents: el degut al moviment de l'aigua que es desplaça ($J_{f,i}$) i al fenomen de sedimentació degut a la força de la gravetat ($J_{s,i}$). En la figura 3.6 es mostra la direcció i el valor dels fluxos de matèria degut al dos fenòmens proposats diferenciant les capes situades per sobre i per sota del corrent d'entrada al decantador.

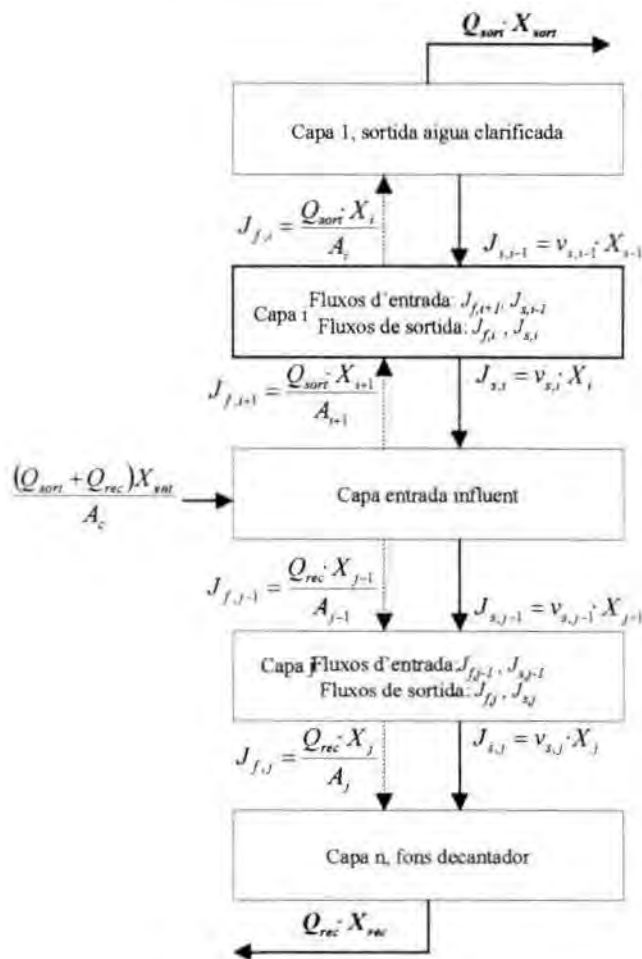


Figura 3.6: Fluxos de sòlids entre les capes del decantador

- on:
- $J_{f,i}$ flux de sòlids degut al moviment d'aigua, $Kg \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$
 - $J_{s,i}$ flux de sòlids degut a la força de la gravetat, $Kg \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$
 - V_i volum de la capa i , m^3
 - A_i àrea de pas entre les capes, m^2
 - X_i concentració de sòlids en la capa i , $Kg \cdot m^{-3}$
 - t temps, dies

Els fluxos de sòlids $J_{s,i}$ i $J_{s,j}$ sempre tenen una direcció descendent tal i com es mostra en la figura 3.6 amb una fletxa continua. El flux d'aigua pot ser ascendent o descendent en funció de la posició de la capa. Així, per a les capes situades per sobre de l'alimentació la direcció és ascendent i per a les de la zona de compactació o inferior, descendent. Les línies dels fluxos d'aigua es mostren en discontinu.

El balanç de sòlids per unitat d'àrea ($Kg \cdot m^{-2} \cdot dia^{-1}$) en qualsevol capa situada per sobre de l'alimentació serà:

$$(J_{f,i} + J_{s,i}) - (J_{f,i+1} + J_{s,i-1}) + \frac{V_i}{A_i} \frac{dX_i}{dt} = 0 \quad (\text{Eq. 3.3})$$

i per sota de la capa d'alimentació:

$$(J_{f,i} + J_{s,i}) - (J_{f,i-1} + J_{s,i-1}) + \frac{V_i}{A_i} \frac{dX_i}{dt} = 0 \quad (\text{Eq. 3.4})$$

El flux de sòlids de cadascuna de les capes del decantador depèn de la concentració de sòlids de la capa (X_i) així com de la seva velocitat de sedimentació $v_{s,i}$ ($m \cdot dia^{-1}$). Calculada a partir de l'equació 3.5.

$$v_{s,i} = v_0 e^{-\alpha_{hin} X_i^0} - v_0 e^{-\alpha_{flo} X_i^0} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

on:

- $v_{s,i}$ velocitat de sedimentació a la capa i , $m \cdot dia^{-1}$

| | |
|-------------------------|--|
| v_0 | velocitat màxima de sedimentació, $m \cdot dia^{-1}$ |
| $rhin$ | paràmetre de sedimentació de la zona de compactació, $m^3 \cdot gr^{-1}$ |
| $rflo$ | paràmetre de sedimentació de la zona floculant, $m^3 \cdot gr^{-1}$. |
| $X_i^0 = X_i - X_{min}$ | on X_{min} és la concentració mínima de sòlids que es pot assolir i X_i la concentració de sòlids de la capa i |

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

Si representem l'equació 3.5, tal i com es mostra en la Figura 3.7, es poden diferenciar quatre zones. La velocitat màxima de sedimentació s'obté per la concentració de sòlids $X_{i,max}^0$ definida en l'equació 3.6.

$$X_{i,max}^0 = \frac{1}{rhin - rflo} \ln \left[\frac{rhin}{rflo} \right] \quad (\text{Eq. 3.6})$$

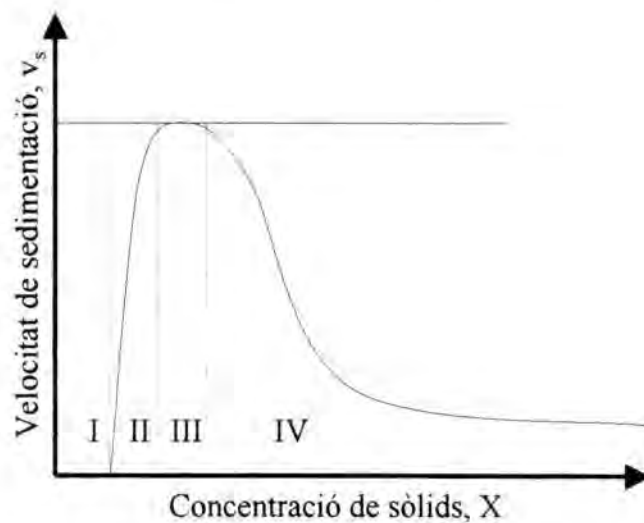


Figura 3.7: Representació del model de la velocitat de sedimentació.

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

Zona II. Les partícules de sòlids van creixent per fenòmens de floculació, dominat per tant el paràmetre r_{flo} de l'equació 3.5.

Zona III. Les partícules de sòlids han assolit el seu tamany màxim i per tant la velocitat de sedimentació es manté aproximadament constant.

Zona IV. Apareixen els fenòmens de compactació de forma que el paràmetre r_{hin} de l'equació 3.5 és el dominant.

3.2.3 Models de EDARs

Un cop definits els models matemàtics per a cadascuna de les operacions unitàries d'una EDAR, cal agrupar-los per tal d'obtenir un model global de la planta. En aquest agrupament caldrà relacionar els diferents corrents d'entrada i sortida entre les unitats.

3.3 SIMULACIÓ DE EDARs.

La simulació d'una EDAR pot efectuar-se a partir del desenvolupament d'un nou programa informàtic que s'ajusti a la nostra planta. Tot i així, existeix la possibilitat d'utilitzar plataformes ja desenvolupades que ens permetin accedir amb facilitat als models matemàtics disponibles per a la simulació de sistemes biològics de tractament d'aigües residuals. Per a la realització d'aquesta tesi s'ha utilitzat un entorn comercial de simulació com és el *General Purpose Simulator* (GPS-X) desenvolupat per *Hydromantis Inc.* (Canadà).

El GPS-X no és l'únic programa disponible per a la simulació de EDARs, existeixen en l'actualitat altres programes comercials que ens permeten modelitzar i simular els processos biològics de tractament d'aigües residuals. Així, diferenciant entre simuladors d'estat estacionari i dinàmics, es poden utilitzar el *Single Sludge Simulation Program* (SSSP) i el *ASIM* com a simuladors d'estat estacionari, i el *STOAT* i el *GPS-X* com a simuladors dinàmics.

Les simulacions que es presenten en aquest treball s'efectuen amb el GPS-X, que a més de permetre la simulació dinàmiques es poden utilitzar tècniques d'optimització de paràmetres (calibració), llaços de control automàtic (P, PI i PID), actuacions en línia durant la simulació i anàlisis de sensibilitat de qualsevol paràmetres del model o d'operació.

3.3.1 SSSP. Single Sludge Simulation Program .

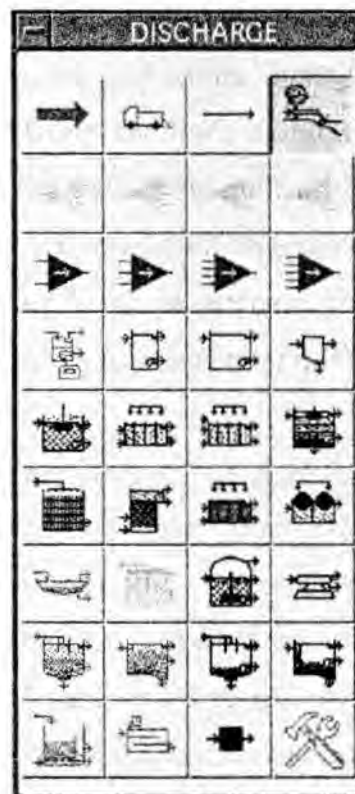
Esta basat en el model N° 1 de la IAWQ (ASM1) i no inclou la possibilitat d'adoptar nous models. Es un programa basat en el càlcul de l'estat estacionari i per tant no inclou processos dinàmics tal com la simulació d'un perfil diari.

Dins dels avantatges de que disposa el SSSP inclouríem la possibilitat de definir un diagrama de procés compost de varis reactors amb recirculacions. Les seves limitacions, a part de la simulació en estat estacionari, es concentren en la seva poca flexibilitat. No es possibles per exemple, calibrar de forma automàtica els paràmetres del model, que cal subministrar en una fulla d'especificacions. L'entorn de treball es un entorn de MS-DOS i no inclou una interfície gràfica que permeti visualitzar els resultats gràficament (taules de valors).








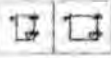







3.3.2 GPS-X. Una eina de simulació.














El GPS-X[®] és un programa informàtic que permet simular la major part de les EDARs. Funciona en un entorn X-Windows sobre plataformes SUN-Solaris o Windows NT. La modelització de l'EDAR s'efectua en un entorn de programació orientada a l'objecte. L'usuari dibuixa el diagrama de procés de la planta connectant les diferents unitats amb línies que indiquen els canals i canonades de la planta.

Cada objecte està associat a una sèrie de propietats que poden dividir-se en:



- a) Configuració hidràulica. Es refereix al nombre de connexions de que disposa un objecte i de si són d'entrada o de sortida.
- b) Propietats físiques i d'operació. Inclou la descripció quantitativa de les dimensions i capacitats reals de l'objecte i de quins són els seus paràmetres d'operació.
- c) Per a cadascuna de les unitats es disposa de l'opció d'escollir entre diferents models matemàtics referits al seu comportament.
- d) Variables disponibles. Són les variables d'estat i definides de l'objecte que es poden escollir per a obtenir-ne una representació gràfica o fitxer de resultats.
- e) Origen dels paràmetres (sources). Indica de quina altra unitat del diagrama provenen els paràmetres del model escollit per a la unitat. D'aquesta forma es poden utilitzar paràmetres diferents per a unitats diferents o considerar que els paràmetres del model seran constants en qualsevol de les unitats.
- f) Etiquetes. Permet anomenar cada connexió d'entrada o sortida així com l'objecte amb un nom que el pot fer més identificable per a l'usuari.

Els objectes dels que disposa el GPS-X són: 1) influent , 2) descàrrega en discontinu , 3) conduccions , 4) sortida o efluent , 5) bifurcacions (2, 3, 4 ó 5)  i unions (2, 3, 4 ó 5)  de corrents, 6) estacions de bombeig , 7) tancs pulmó o d'homogenització , 8) cambra de sedimentació grollera , 9) reactor biològic continu de tanc agitat (RCTA) , 10) reactors biològics de flux pistó (amb una o dues entrades i dividits en n RCTAs) , 11) reactor biològic discontinu -SBR- , 12) filtres percoladors , 13) biofiltres , 14) sistemes híbrids , 15) reactors biològics rotatoris de

contacte (biodiscs ó RBC) , 16) sistemes de llacunatge , 17) unitats de flotació , 18) digestors anaerobis , 19) unitats de filtració , 20) decantadors primaris (circulars o rectangulars)  , 21) decantadors secundaris (circulars o rectangulars)  , 22) filtres de sorra, 23) cloració i 24) altres utilitats com models de caixa, respirometria, ...    .

Els objectes o unitats disponibles poden o no tenir volum. Per exemple, les unitats d'influent i efluent no disposen d'un volum sinó que indiquen les entrades i sortides del nostre sistema. Tots els objectes amb volum tindran com a mínim una entrada i una sortida i el volum ocupat vindrà determinat a partir del balanç global suposant un sistema de barreja completa (RCTA):

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^n Q_i - \sum_{i=1}^m Q_i \quad (\text{Eq. 3.7})$$

on: $\frac{dV}{dt}$ Variació del volum respecte del temps

n Nombre d'entrades

m Nombre de sortides

Q_i Cabal volumètric del corrent i

La possibilitat de considerar un volum ocupat variable per a cadascuna de les unitats, estableix la necessitat de desenvolupar un balanç de cadascun dels components tenint en compte aquest efecte:

$$\sum_{i=1}^n Q_{in,i} C_{in,i} - \sum_{i=1}^m Q_{out,i} C_j + r_j = \frac{d(C_j \cdot V)}{dt} = V \frac{\partial C_j}{\partial t} + C_j \frac{\partial V}{\partial t} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

on: Q_{in} Cabal d'entrada

Q_{out} Cabal de sortida

V Volum de la unitat

$C_{in,j}$ Concentració del component j a l'entrada

- C_j Concentració del component a la sortida
 r_j Velocitat amb la que el component j reacciona

Les unitats definides amb un comportament de flux pistó es defineixen com el resultat de n reactors continus de tanc agitat en sèrie, de forma que les variables de sortida vindran definides com una matriu de dimensió ($n \times I$). Aquest seria el cas dels reactors biològics de flux pistó o dels decantadors circulars secundaris.

A continuació es mostra una breu descripció de com funciona el GPS-X. Quines són les variables d'estat utilitzades i com s'agrupen en diferents llibreries. Com es descriuen els corrents d'entrada i de quina forma es relacionen les variables analítiques amb les d'estat i quins models de depuració biològica i decantació utilitza.

3.3.2.1 Variables d'estat i llibreries disponibles.

El GPS-X inclou la possibilitat de treballar amb diferents variables d'estat en funció de les necessitats de la simulació o dels objectius buscats. Cadascuna d'aquestes combinacions es recull dins d'una llibreria, de les que n'hi ha quatre disponibles: 1) Carboni - Nitrogen (CN), 2) Carboni - Nitrogen - Fòsfor (CNP), 3) Carboni - Nitrogen ampliada (CN2) i 4) contaminants industrials (IP).

Per a cadascuna de les llibreries, es disposa de varis models en funció de la unitat seleccionada. Cadascun dels models defineix les seves variables d'estat en funció de les de la llibreria. D'aquesta manera models d'eliminació de nutrients (carboni, nitrogen i fòsfor) no es trobaran en la llibreria CN ja que aquesta no inclou les variables d'estat referides al fòsfor o a la biomassa capaç d'acumular-lo.

La utilització de models mecanístics que utilitzen variables d'estat molt específiques per a cadascun dels processos que consideren provoca que moltes de les variables d'estat no siguin observables directament (dades analítiques). Es per això que en cadascuna de les llibreries es disposa de relacions entre les variables observables (dades analítiques) i les variables d'estat. Dins de les dades analítiques

que es poden obtenir amb certa facilitat tindriem: la demanda química d'oxigen (DQO) soluble i total, la demanda biològica d'oxigen als 5 dies (DBO_5) i l'última (DBO_u), els sòlids en suspensió totals (SST) i volàtils (SSV), el nitrogen amoniacal o amoni (NH_4^+), els nitrats i nitrits (NO_3^- i NO_2^-), el nitrogen Kjeldhal (NKT) total i soluble, ...

Llibreria CN. Permet simular els processos d'eliminació de matèria orgànica i nitrogen. Consta de 12 variables d'estat, que són: 1) substrat soluble ràpidament biodegradable (ss), 2) substrat lentament biodegradable (particulat) (xs), 3) compostos orgànics inerts particulats (xi), 4) compostos orgànics inerts solubles (si), 5) biomassa heterotròfica activa (xbh), 6) biomassa autotròfica activa (xba), 7) compostos particulats no biodegradables de la mort dels microorganismes (xu), 8) oxigen dissolt (so), 9) nitrogen oxidat (nitrats i nitrits, sno), 10) nitrogen amoniacal lliure i ionitzat (snh), 11) nitrogen orgànic soluble biodegradable (snd) i 12) nitrogen orgànic particulat biodegradable (xnd).

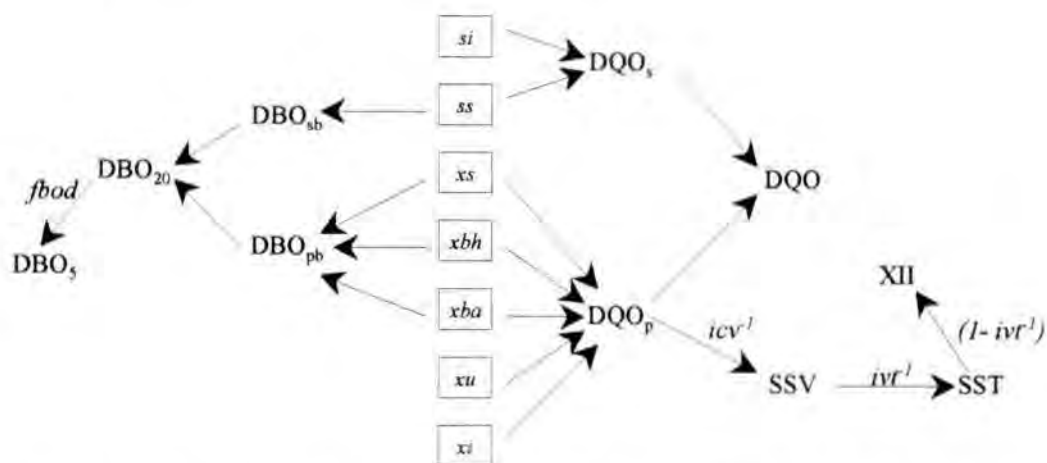


Figura 3.8: Relació entre les variables de la llibreria CN i la DBO_5 , SST i DQO.

La relació entre les variables d'estat referides a la biomassa i a la matèria orgànica es mostra en la figura 3.8. Per a la conversió de les variables d'estat en les variables analítiques és necessari el coneixement dels coeficients estequiomètrics $fbod$, icv i ivt . Aquest coeficients fan referència a les relacions DBO_5/DBO_{20} , SSV/DQO_p i SSV/SST respectivament. Apareix una altra variable, la XII que fa referència al sòlids en suspensió no volàtils que es consideren inerts.

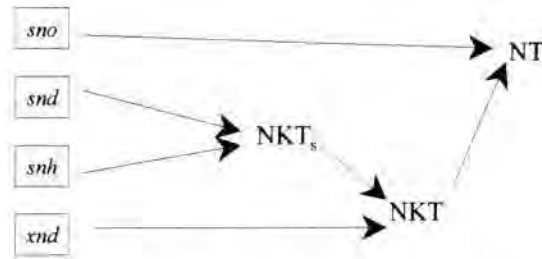


Figura 3.9: Relació entre les variables de la llibreria CN i els compostos nitrogenats.

El nitrogen total (NT) inclou tant els nitrats com els nitrits (sno) i el nitrogen Kjeldhal total (NKT). La fracció particulada del NKT s'associa al nitrogen orgànic biodegradable particulat, i la soluble en divideix en amoni (snh) i nitrogen orgànic soluble biodegradable tal com es mostra en la figura 3.9.

Llibreria CNP. Consta de 17 variables d'estat que permeten modelitzar l'eliminació de matèria orgànica, nitrogen i fòsfor. Les variables d'estat són: 1) biomassa heterotròfica activa (xbh), 2) biomassa autotròfica activa (xba), 3) biomassa acumuladora de fòsfor (xbp), 4) compostos particulats no biodegradables de la mort dels microorganismes (xu), 5) substrat lentament biodegradable (particulat xs), 6) orgànics inerts particulats (xi), 7) nitrogen orgànic particulat biodegradable (xnd), 8) Poly-hidroxi-alconats (xbt), 9) polifosfat acumulat (xpp), 10) substrat soluble ràpidament biodegradable (ss), 11) àcids grassos volàtils (slf), 12) nitrogen amoniacal lliure o ionitzat (snh), 13) nitrogen orgànic soluble biodegradable (snd), 14) nitrats i nitrits (sno), 15) fòsfor soluble (sp), 16) compostos orgànics inerts solubles (si) i 17) oxigen dissolt (so).

Les diferències entre la llibreria CN i CNP venen donades per l'addició de les variables d'estat referides al fòsfor, cosa que fa canviar la forma de calcular la DBO i la DQO de les aigües (figura 3.10). LA relació entre els compostos nitrogenats segueix la mateixa forma que la llibreria CN (figura 3.9).

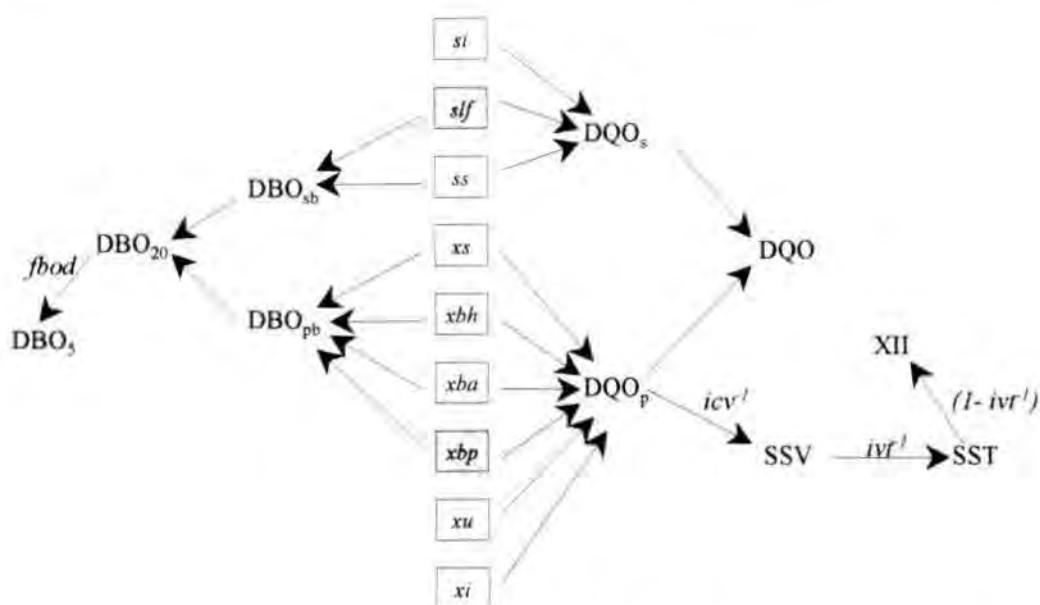


Figura 3.10: Relació entre les variables de la llibreria CNP i DBO_5 , SST i DQO.
En blau les variables d'estat afegides respecte la llibreria CN.

Llibreria CN2. Les diferències entre la llibreria CN2 i la CN es basen en que aquí es defineixen dues noves variables, l'alcalinitat i el nitrogen inert. A més la biomassa nitrificant (autòtrofs) es divideixen en *nitrosomonas* i *nitrobacter*, diferenciant per tant la nitritificació i la nitrificació. En global tenim 19 variables d'estat: 1) substrat soluble ràpidament biodegradable (*ss*), 2) compostos orgànics inerts particulats (*xi*), 3) substrat lentament biodegradable (particulat) (*xs*), 4) nitrogen amoniacal lliure i ionitzat (*snh*), 5) substrat ràpidament hidrolitzable (*ssh*), 6) compostos inorgànics inerts particulats (*xii*), 7) compostos orgànics inerts solubles (*si*), 8) biomassa heterotròfica activa (*xbh*), 9) bacteris nitrosomonas actius (*xbai*), 10) bacteris nitrobacter actius (*xbaa*), 11) compostos particulats no biodegradables de la mort dels microorganismes (*xu*), 12) oxigen dissolt (*so*), 13) nitrits (*snoi*), 14) nitrats (*snoa*), 15) nitrogen orgànic soluble biodegradable (*snd*), 16) nitrogen orgànic particulat biodegradable (*xnd*), 17) nitrogen orgànic inert soluble (*sni*), 18) nitrogen orgànic inert particulat (*xni*) i 19) alcalinitat (*salk*).

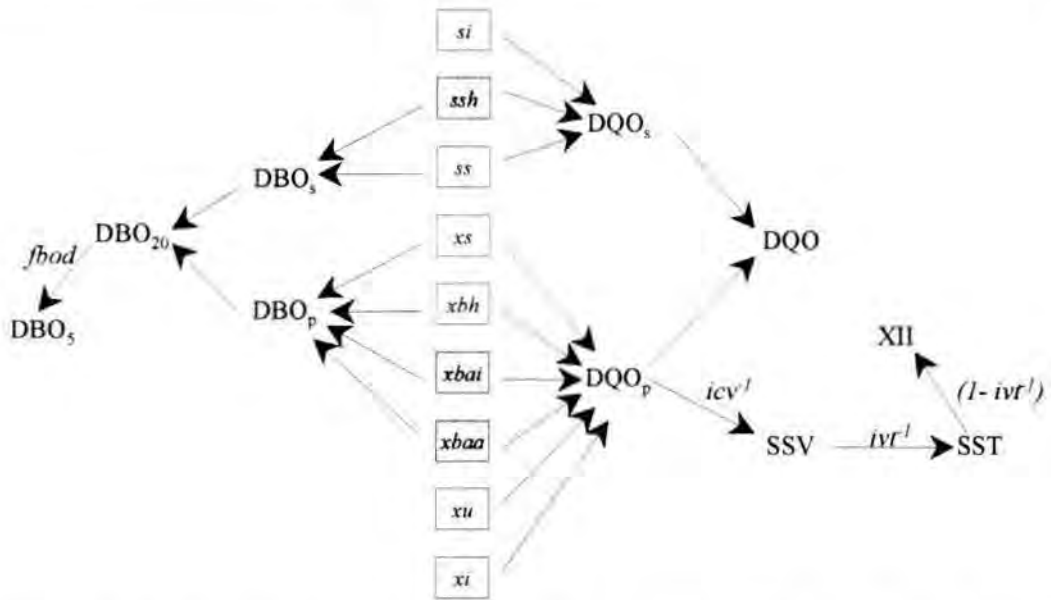


Figura 3.11: Relació entre les variables de la llibreria CN2 i DBO_5 , SST i DQO .
En blau les variables d'estat afegides respecte la llibreria CN.

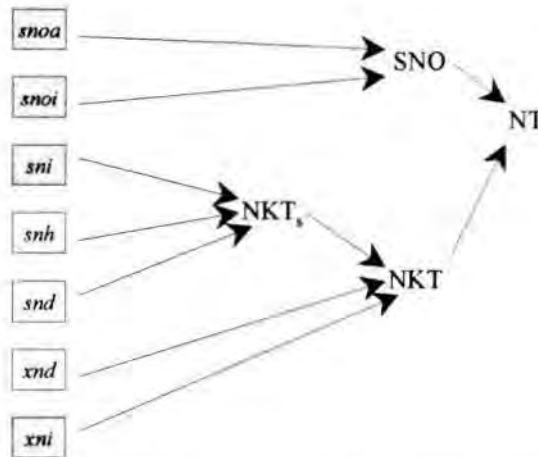


Figura 3.12: Relació entre les variables de la llibreria CN2 i els compostos nitrogenats.

Les relacions entre la matèria orgànica i la biomassa amb les dades analítiques es mostra en la figura 3.11, en tant que els compostos nitrogenats en la figura 3.12.

3.3.2.2 Models d'influent

Tant important com la calibració dels paràmetres del model o el coneixement de les condicions d'operacions és la definició dels valors de les variables d'estat a

l'entrada de la planta. En el GPS-X, independentment de la llibreria utilitzada, es poden definir les variables d'estat a l'entrada de diverses formes: 1) a partir de la DBO, 2) amb la DQO, 3) amb les variables d'estat de la llibreria escollida, 4) amb la combinació de la DBO i la DQO i 5) amb les variables definides en el model N° 2 de la IAWPRC.

A continuació es mostra com es calculen les variables d'estat de la llibreria CN en els corrents d'entrada a la planta en funció de l'opció escollida. Per a les altres llibreries es segueix un procediment semblant.

Llibreria CN. Definició de l'influent basat en la DBO₅. S'utilitza només si la DQO no és disponible i cal anar amb molt de compte a l'hora d'estimar els compostos inerts particulats de l'entrada. Els paràmetres necessaris serien: 1) DBO₅, 2) SST, 3) NKT i 4) alguns paràmetres estequiomètrics. Cal definir també algunes variables d'estat (6/12), la biomassa autotròfica i heterotròfica (x_{ba} i x_{bh}), els compostos particulats no biodegradables de la mort cel·lular (x_u), els compostos orgànics inerts solubles (s_i), l'oxigen dissolt (s_o) i els nitrats i nitrits (s_{no}) que normalment valen zero a excepte els compostos orgànics inerts solubles. Les altres 6 variables es calculen segons l'esquema de la figura 3.13.

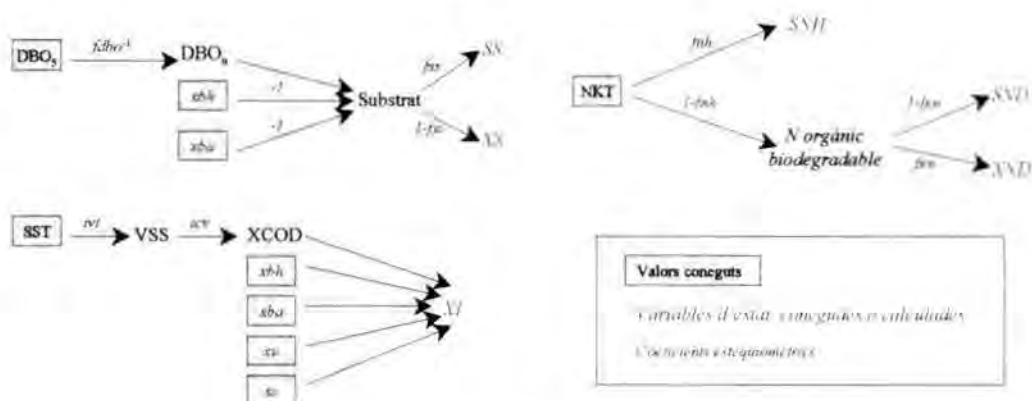


Figura 3.13: Llibreria CN. Càlcul de les variables d'estat a l'influent basat en la DBO₅.

Llibreria CN. Definició de l'influent basat en la DQO. El model d'influent basat en la DQO és apropiat sempre que es conegui la DQO i els components individuals de l'aigua residual es mantinguin més o menys constants (per

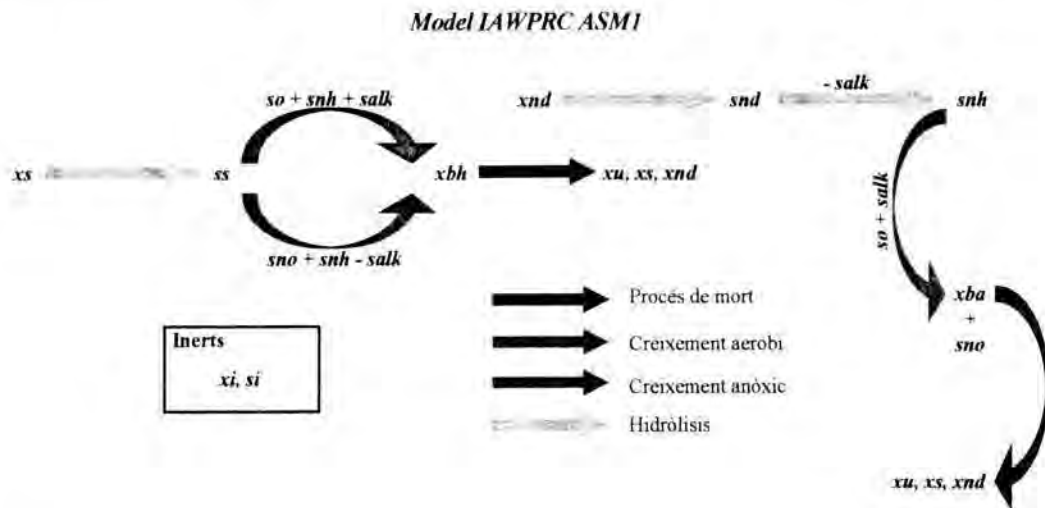


Figura 3.16 . Model ASM1. Relacions entre els processos i les variables d'estat.

3.3.2.3.2 Model Mantis.

Model desenvolupat per *Hydromantis Inc.*, es basa en el model N°1 de la IAWPRC amb les següents modificacions: 1) l'alcalinitat no es té en compte (es considera suficient), 2) inclou dos processos addicionals de creixement per als bacteris heterotròfics i autotròfics i 3) inclou la dependència de la temperatura dels paràmetres cinètics. En total considera 10 processos biològics en la llibreria CN i 15 en la CN2. Processos en la llibreria CN (figura 3.17): 1) creixement aerobi dels organismes heterotròfics amb la presència d'amoni, 2) creixement anòxic dels organismes heterotròfics amb presència d'amoni, 3) creixement aerobi dels organismes heterotròfics amb la presència de nitrats i nitrits, 4) creixement anòxic dels organismes heterotròfics amb la presència de nitrats i nitrits, 5) mort dels organismes heterotròfics, 6) hidròlisi dels compostos orgànics particulats, 7) hidròlisi del nitrogen orgànic, 8) amonificació, 9) creixement dels organismes autotròfics i 10) mort dels organismes autotròfics.

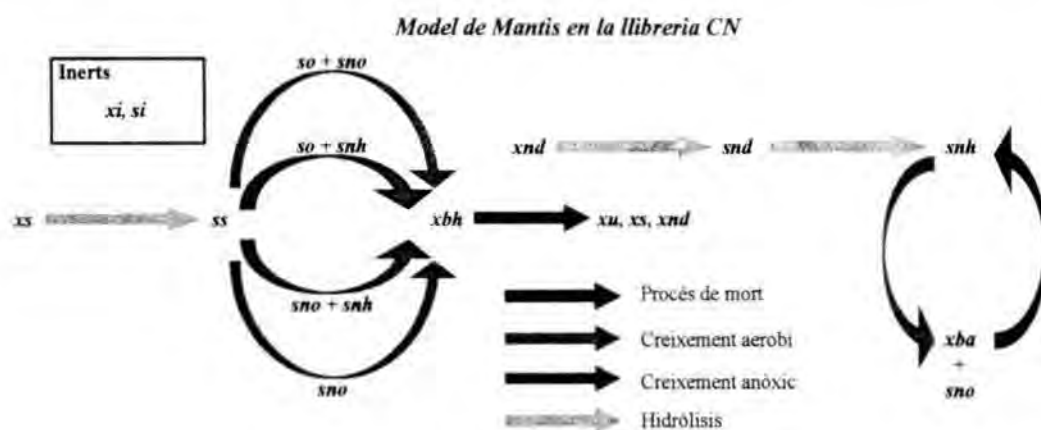


Figura 3.17. Model Mantis en la llibreria CN. Relacions entre els processos i les variables d'estat.

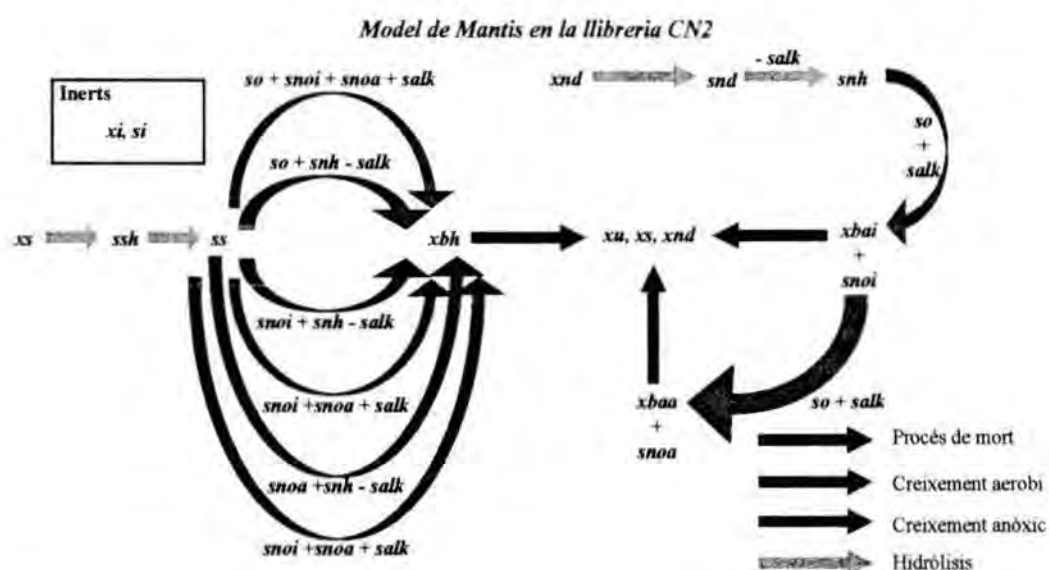


Figura 3.18. Model Mantis en la llibreria CN2. Relacions entre els processos i les variables d'estat.

En la llibreria CN2 (figura 3.18), i degut a la diferenciació entre nitrats i nitrits, els 15 processos considerats són: 1) creixement aeròbic dels organismes heterotròfics amb la presència d'amoni, 2) creixement aeròbic dels organismes heterotròfics amb la presència de nitrats i nitrits, 3) creixement anòxic dels organismes heterotròfics amb la presència d'amoni i nitrits, 4) creixement anòxic dels organismes heterotròfics amb la presència de nitrits, 5) creixement anòxic dels organismes heterotròfics amb la presència d'amoni i nitrats, 6) creixement anòxic dels organismes heterotròfics amb la presència de nitrats, 7) creixement de les

nitrosomonas, 8) creixement dels nitrobacter, 9) morts dels organismes heterotròfics, 10) mort de les nitrosomonas, 11) mort dels nitrobacter, 12) amonificació, 13) hidròlisis de compostos orgànics solubles, 14) hidròlisis del compostos orgànics particulats i 15) hidròlisis del nitrogen orgànic particulat.

3.3.2.3.3 Model reduït.

És un model on el nombre de variables d'estat han estat reduïdes per tal de simplificar-ne l'ajust i el càlcul dels paràmetres del model. Inclou només 5 variables d'estat: 1) substrat orgànic biodegradable (x_{cod}), 2) nitrogen amoniacal (s_{nh}), 3) nitrats (s_{no}), 4) biomassa autotròfica (x_{ba}) i 5) biomassa heterotròfica (x_{bh}). Les condicions d'operació es limiten a dos entorns: 1) aeròbic i 2) anòxic. Els processos que es tenen en compte són 4 (figura 3.19): 1) creixement dels organismes heterotròfics, 2) creixement del organismes autotròfics, 3) mort dels heterotròfics i 4) mort dels autotròfics.

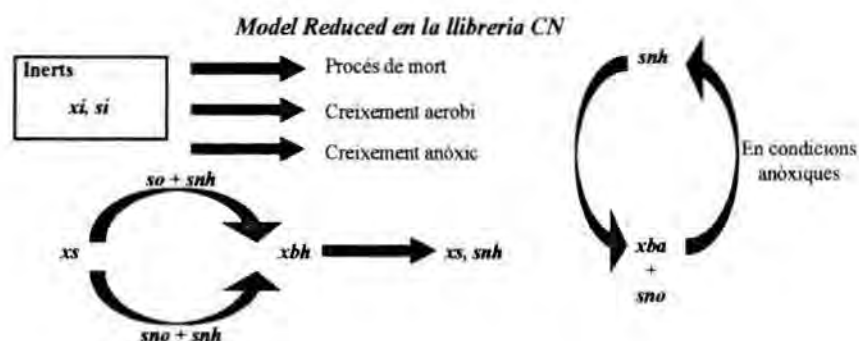


Figura 3.19. Model Reduït. Relacions entre els processos i les variables d'estat.

3.3.2.3.4 NRMantis.

Disponible només per als reactors biològics discontinus (SBR). El model és el mateix que el de Mantis (figures 3.17 i 3.18), però durant els períodes de decantació - sedimentació no es té en compte la reacció biològica.

3.3.2.3.5 Model general.

6) creixement anòxic dels microorganismes heterotròfics amb la presència d'àcids grassos volàtils i amoni, 7) creixement aeròbic dels microorganismes heterotròfics amb la presència d'àcids grassos volàtils i nitrats i nitrits, 8) creixement anòxic dels microorganismes heterotròfics amb la presència d'àcids grassos volàtils i nitrats i nitrits, 9) morts dels microorganismes heterotròfics, 10) hidròlisi dels compostos orgànics particulats, 11) hidròlisis del nitrogen orgànic, 12) amonificació, 13) conversió de la matèria orgànica ràpidament biodegradable (*ss*) en acetat, 14) creixement dels microorganismes autotròfics, 15) mort dels microorganismes autotròfics, 16) creixement aeròbic dels organismes acumuladors de fosfat (*xbp*), 17) creixement aeròbic dels organismes acumuladors de fosfat (*xbp*) amb la presència de nitrats i nitrits, 18) procés 16 si la quantitat de fosfat disponible (*sp*) és limitat o zero, 19) procés 17 si la quantitat de fosfat disponible (*sp*) és limitat o zero, 20) mort en condicions aeròbiques dels microorganismes acumuladors de fosfat (*xbp*), 21) procés de trencament dels polifosfats durant el procés de mort dels organismes acumuladors de fosfats (*xbp*), 22) trencament dels productes d'acumulació dels organismes acumuladors de fosfats (PoliHidroxiAlcanats - PHA) durant el procés de mort dels organismes acumuladors de fosfat (*xbp*) en condicions aeròbiques, 23) mort en condicions anaeròbiques dels organismes acumuladors de fosfat, 24) trencament dels polifosfats en condicions aeròbiques, 25) trencament dels productes d'acumulació dels organismes acumuladors de fosfats (PoliHidroxiAlcanats - PHA) durant el procés de mort dels organismes acumuladors de fosfat (*xbp*) en condicions anaeròbiques, 26) transformació dels polifosfats en fosfats (*sp*) durant els períodes de manteniment cel·lular en condicions anaeròbiques, 27) captació de PHA per els organismes acumuladors de fosfat, 28) creixement dels microorganismes acumuladors de fosfat en condicions anòxiques i amb la presència d'amoni.

3.3.2.3.6 Model ASM2.

Model N° 2 de la IAWQ - ASM2- (Henze et al. 1995). Disponible únicament en la llibreria CNP i considerant un total de 17 processos. Les matrius de Peterson del model es mostren en les taules 3.3 (coeficients estequiomètrics dels compostos solubles), 3.4 (coeficients estequiomètrics dels compostos particulats) i 3.5 (velocitats de reacció).

| Procés \ Variables | S_{O_2} | S_F | S_A | S_{NH_4} | S_{NO_3} | S_{PO_4} | S_I | S_{ALK} | S_{N_2} |
|-----------------------------------|-----------|----------|----------|------------|-------------|-------------|-------|-----------|-----------|
| Hidròlisis | | | | | | | | | |
| 1. Hidròlisis aeròbica | | +1 | | + | | + | | + | |
| 2. Hidròlisis anòxica | | +1 | | + | | + | | + | |
| 3. Hidròlisis anaeròbica | | +1 | | + | | + | | + | |
| Org. Heterotròfics | | | | | | | | | |
| 4. Creixement en S_F | - | $-1/Y_H$ | | - | | - | | - | |
| 5. Creixement en S_A | - | | $-1/Y_H$ | - | | - | | + | |
| 6. Desnitrificació amb S_F | | $-1/Y_H$ | | - | - | - | | + | + |
| 7. Desnitrificació amb S_A | | | $-1/Y_H$ | - | - | - | | + | + |
| 8. Fermentació | | -1 | +1 | + | | + | | - | |
| 9. Lisis (mort) | | | | + | | + | | + | |
| Org. Acumuladors de fòsfor | | | | | | | | | |
| 10. Acumulació de X_{PHA} | | | -1 | | | $+Y_{PO_4}$ | | - | |
| 11. Acumulació de X_{PP} | - | | | | | -1 | | + | |
| 12. Creixement aeròbic | - | | | - | | - | | - | |
| 13. Lisis de X_{PAO} | | | | + | | + | | + | |
| 14. Lisis de X_{PP} | | | | | | +1 | | - | |
| 15. Lisis de X_{PHA} | | | +1 | | | | | - | |
| Org. Autotròfics | | | | | | | | | |
| 16. Creixement | - | | | - | $1/Y_{AUT}$ | - | | - | |
| 17. Lisis (mort) | | | | + | | + | | + | |

Taula 3.3. Matriu de coeficients estequiòmètrics dels compostos solubles del model N°2

| Procés \ Variables | X_I | X_S | X_H | X_{PAO} | X_{PP} | X_{PHA} | X_{AUT} | X_{TSS} |
|-----------------------------------|-------|---------|-------|-----------|-------------|--------------|-----------|-----------|
| Hidròlisis | | | | | | | | |
| 1. Hidròlisis aeròbica | | -1 | | | | | | - |
| 2. Hidròlisis anòxica | | -1 | | | | | | - |
| 3. Hidròlisis anaeròbica | | -1 | | | | | | - |
| Org. Heterotròfics | | | | | | | | |
| 4. Creixement en S_F | | | +1 | | | | | + |
| 5. Creixement en S_A | | | +1 | | | | | + |
| 6. Desnitrificació amb S_F | | | +1 | | | | | + |
| 7. Desnitrificació amb S_A | | | +1 | | | | | + |
| 8. Fermentació | | | | | | | | |
| 9. Lisis (mort) | f_l | $1-f_l$ | -1 | | | | | - |
| Org. Acumuladors de fòsfor | | | | | | | | |
| 10. Acumulació de X_{PHA} | | | | | $-Y_{PO_4}$ | +1 | | - |
| 11. Acumulació de X_{PP} | | | | | +1 | $-Y_{PHA}$ | | + |
| 12. Creixement aeròbic | | | | | | $-1/Y_{PAO}$ | | - |
| 13. Lisis de X_{PAO} | f_l | $1-f_l$ | | -1 | | | | - |
| 14. Lisis de X_{PP} | | | | | -1 | | | - |
| 15. Lisis de X_{PHA} | | | | | | -1 | | - |
| Org. Autotròfics | | | | | | | | |
| 16. Creixement | | | | | | | +1 | + |
| 17. Lisis (mort) | f_l | $1-f_l$ | | | | | -1 | - |

Taula 3.4. Matriu de coeficients estequiòmètrics dels compostos particulats del model N°2

| Procés | Velocitat de reacció |
|-----------------------------------|---|
| Hidròlisis | |
| 1. Hidròlisis aeròbica | $K_h \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{X_S / X_H}{K_X + X_S / X_H} \cdot X_H$ |
| 2. Hidròlisis anòxica | $K_h \cdot \eta_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{X_S / X_H}{K_X + X_S / X_H} \cdot X_H$ |
| 3. Hidròlisis anaeròbica | $K_h \cdot \eta_{fe} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{X_S / X_H}{K_X + X_S / X_H} \cdot X_H$ |
| Org. Heterotròfics | |
| 4. Creixement en S_F | $\mu_H \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_F}{K_F + S_F} \cdot \frac{S_F}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$ |
| 5. Creixement en S_A | $\mu_H \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_A}{K_A + S_A} \cdot \frac{S_A}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot X_H$ |
| 6. Desnitricació amb S_F | $\mu_H \cdot \eta_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_F}{K_F + S_F} \cdot \frac{S_F}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot X_H$ |
| 7. Desnitricació amb S_A | $\mu_H \cdot \eta_{NO_3} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_A}{K_A + S_A} \cdot \frac{S_A}{S_F + S_A} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot X_H$ |
| 8. Fermentació | $q_{fe} \cdot \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \cdot \frac{S_f}{K_{fe} + S_f} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_H$ |
| 9. Lisis (mort) | $b_H \cdot X_H$ |
| Org. Acumuladors de fòsfor | |
| 10. Acumulació de X_{PHA} | $q_{PHA} \cdot \frac{S_A}{K_A + S_A} \cdot \frac{X_{PP} / X_{PAO}}{K_{PP} + X_{PP} / X_{PAO}} \cdot X_{PAO}$ |
| 11. Acumulació de X_{PP} | $q_{PP} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_{PS} + S_{PO_4}} \cdot \frac{X_{PHA} / X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA} / X_{PAO}} \cdot \frac{K_{MAX} - X_{PP} / X_{PAO}}{K_{IPP} + K_{MAX} - X_{PP} / X_{PAO}} \cdot X_{PAO}$ |
| 12. Creixement aeròbic | $\mu_{PAO} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{X_{PHA} / X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA} / X_{PAO}} \cdot X_{PAO}$ |
| 13. Lisis de X_{PAO} | $b_{PAO} \cdot X_{PAO} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}}$ |

| Procés | Velocitat de reacció |
|-------------------------|--|
| 14. Lisis de X_{PP} | $b_{PP} \cdot X_{PP} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}}$ |
| 15. Lisis de X_{PHA} | $b_{PHA} \cdot X_{PHA} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}}$ |
| Org. Autotròfics | |
| 16. Creixement | $\mu_{AUT} \cdot \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \cdot \frac{S_{NH_4}}{K_{NH_4} + S_{NH_4}} \cdot \frac{S_{PO_4}}{K_P + S_{PO_4}} \cdot \frac{S_{ALK}}{K_{ALK} + S_{ALK}} \cdot X_{AUT}$ |
| 17. Lisis (mort) | $b_{AUT} \cdot X_{AUT}$ |

Taula 3.5. Matriu de velocitats de reacció del model N^o2

3.3.2.3.7 Models NRGGeneral i NRASM2.

Aplicables només en el SBR i en la llibreria CNP, al igual que el NRMantis, no consideren la reacció biològica en les etapes de decantació - sedimentació del procés. Es basen en els models General i ASM2 respectivament.

3.3.2.3.8 Models de digestió anaeròbia.

Per a la digestió anaeròbia, l'únic model que incorpora el GPS-X és un model basat en el model de Barnett (1990) amb les següents modificacions: 1) sensibilitat de la temperatura per a la hidròlisis dels sòlids en suspensió volàtils i el creixement dels bacteris metanogènics, 2) modificació de l'equilibri químic a partir d'un model de pH propi, 3) introducció de la variable d'estat referida als compostos orgànics particulars inerts (x_{II}) i 4) introducció d'una velocitat de degradació de compostos tòxics. En total considera 9 variables d'estat diferents i 6 processos: 1) hidròlisis, 2) creixement dels organismes metanogènics, 3) mort dels microorganismes metanogènics, 4) generació de toxicitat, 5) degradació de la toxicitat i 6) transferència del CO_2 a la fase gas.

3.3.2.4 Models de sedimentació i flotació.

Les operacions bàsiques de sedimentació, decantació i compactació de fangs disponibles en el GPS-X són la sedimentació – decantació i la flotació per aire. Els models disponibles en funció de la llibreria utilitzada i el tipus de decanador escollit es mostren en la taula 3.6.

| Model | Llibreria | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | CN | CNP | CN2 | IP |
| Point | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Simple1d | 1,2,3,4,5 | 1,2,3,4,5 | 1,2,3,4,5 | 1,2,3,4,5 |
| Noreac1d | 1,2,3,4 | 1,2,3,4 | 1,2,3,4 | 1,2,3,4 |
| Mantis1d | 1,2,3,4 | 1,2,3,4 | 1,2,3,4 | 1,2,3,4 |
| Sim2d | 1,2 | 1,2,3,4,5 | 1,2 | 1,2 |
| Gener1d | - | 1,2,3,4 | - | - |
| ASM21d | - | 1,2,3,4 | - | - |
| Gen2d | - | 2 | - | - |
| ASM22d | - | 2 | - | - |

¹ Decantador secundari circular ² Decantador secundari rectangular
³ Decantador primari circular ⁴ Decantador primari rectangular
⁵ Flotació per aire.

Taula 3.6. Models de decantació - sedimentació disponibles en el GPS-X.

3.3.2.4.1 Model Point.

Correspondria al model de decantació més senzill possible, es basa en efectuar un balanç de matèria entre l'entrada i les sortides del decantador - sedimentador i no considera en cap cas un flux de matèria entre diferents capes.

3.3.2.4.2 Model Simple1d.

Estableix un flux de sòlids a través de les capes del decantador (3.6), però no te en compte l'efecte de dilució que es produeix per als compostos solubles.

3.3.2.4.3 Noreac1d.

Igual que el model Simple1d però considerant l'efecte de dilució dels compostos solubles. Les diferències entre els models Simple1d i Noreac1d es notaran en el moment en que es l'entrada al decantador presenti oscil·lacions importants per als compostos solubles.

3.3.2.4.4 *Mantis1d, Gener2d i ASM21d.*

Són models unidimensionals basats en el model Noreac1d amb la particularitat de que consideren la reacció biològica segons els models biològics Mantis, General i ASM2 respectivament.

3.3.2.4.5 *Sim2d, Gen2d i ASM22d.*

Són models amb dues dimensions i consideren que en cada capa la concentració de sòlids difereix en funció del radi. El primer (Sim2d) no considera la reacció biològica en tant que els altres dos consideren la reacció biològica segons els models General i ASM2 respectivament.

3.3.2.5 *Altres models.*

A part dels models de reacció biològica i de decantació presentats anteriorment, el GPS-X disposa de models per a moltes altres operacions unitàries a fi i efecte de poder elaborar un model complet de la EDAR. Així trobem models per filtres de sorra, sedimentació grollera, desinfecció, filtrat de fangs, tanc d'homogenització, estacions de bombejament, addició de cisternes a l'entrada, connexions, bifurcacions i sistemes d'alleugeriment de cabal.

3.3.3 Prestacions del GPS-X.

El GPS-X es permet utilitzar diferents models matemàtics per a la simulació de les operacions unitàries més importants en els processos de depuració biològica d'aigües residuals. La modelització de EDARs amb el GPS-X implica una sèrie de procediments previs a l'obtenció de resultats. El primer que cal fer és definir el diagrama de procés de la part de la depuradora que desitgem modelar. Un cop definit el diagrama de procés, es procedeix l'elecció dels models que necessitem i ha efectuar la compilació del programa. S'obté al final d'aquest procés un programa executable que permet efectuar les simulacions desitjades. No totes les simulacions que permet efectuar el GPS-X són iguals. Existeixen diferents tipus de simulacions: estat estacionari, anàlisi de sensibilitat i simulació dinàmica.

3.3.3.1 Estat estacionari.

Entenen com a estat estacionari aquella situació de la planta en que cap de les seves característiques varia amb el temps. En una situació normal aquest seria un cas ideal que poques vegades trobarem, per no dir mai. El GPS-X pot calcular les condicions de l'estat estacionari a partir de les variables d'entrada del model constants. Es a dir, el valor que prendrien les diferents variables del model (cabals i concentracions per a qualsevol punt del model) si es mantenen constant tant les condicions d'operació com les característiques de l'entrada.

La utilitat principal del càlcul de l'estat estacionari és per a trobar les condicions inicials per a una simulació dinàmica.

3.3.3.2 Anàlisi de sensibilitat.

De res serveix disposar d'un model si aquest no es pot calibrar per al nostre sistema concret. Amb l'ajut dels anàlisis de sensibilitat, es pot determinar quins són els paràmetres del model que afecten més al seu comportament i així enfocar la calibració cap a l'ajust dels paràmetres que afecten més al seu comportament. Amb el GPS-X es poden efectuar diferents tipus d'anàlisis de sensibilitat.

Anàlisi de sensibilitat en estat estacionari. Calcula com afecta el valor d'un paràmetre del model en les condicions que aquest assoleix a l'estat estacionari.

Anàlisi de sensibilitat dinàmic. Calcula la resposta dinàmica del sistema per a diferents valors d'un paràmetre del model. Es diferencia de l'anàlisi de l'estat estacionari en que aquí tenim altres paràmetres que variem amb el temps.

3.3.3.3 Simulacions dinàmiques.

Per a la simulació d'una EDAR en estat estacionari no fan falta gran programes informàtics, de fet en l'actualitat, i partir de les equacions de disseny utilitzades per al disseny de la majoria de EDARs actuals ja s'utilitzen models d'estat estacionari. Ara bé, la realitat en una EDAR qualsevol és que treballen en estat no estacionari. Fins i tot si prenem una depuradora en la que les condicions

d'operació no es modifiquin, sempre tindrem una gran variabilitat en les condicions de l'aigua residual que ens arriben a la depuradora. Algunes de les característiques d'aquesta aigua les podem més o menys mantenir constants (per exemple la utilització de dipòsits pulmó per a l'obtenció de cabals constants) però la presència de pertorbacions en l'entrada és un fenomen normal per a qualsevol depuradora. És aquí on la simulació dinàmica de la depuradora ens pot fer servei. Podem saber com es comportarà la depuradora per a diferents condicions fixes, però la possibilitat de conèixer com anirà d'un estat a un altre (la transició) només la podem saber de dues formes: experimentalment o amb la simulació dinàmica.

3.3.3.4 Calibració del model.

Podem treballar amb el simulador amb relativa facilitat, ara bé, la fiabilitat dels resultats que obtenim es basaran en gran manera en la calibració del model en la nostra planta. El GPS-X permet efectuar una calibració del model a partir de les dades experimentals disponibles. Així, coneixen els valors de les principals variables d'estat del sistema per a diferents punts de la EDAR (com a mínim entrada i sortida) es pot calcular un valor per als diferents paràmetres cinètics i estequiòmètrics del model.

Per aquelles plantes de les que no es disposa d'una gran quantitat de dades analítiques, es poden utilitzar els paràmetres estequiòmètrics i cinètics més usuals que es troben referenciats en la bibliografia i incorporats en el mateix programa.

_____ *SIMULACIÓ DE EDARs*

4. UTILITZACIÓ DE LA SIMULACIÓ PER A L'AMPLIACIÓ D'UNA EDAR. ELIMINACIÓ DE NITROGEN EN UNA INDÚSTRIA ALIMENTÀRIA.

4.1 DESCRIPCIÓ DE L'EDAR.

L'estació depuradora objecte de l'estudi correspon a una indústria alimentària que en els processos de neteja utilitzen grans quantitats d'àcid nítric que arriben posteriorment a la depuradora en forma de nitrats. En l'actualitat la depuradora només elimina la matèria orgànica. El diagrama de procés de la EDAR actual es mostra en la figura 4.1.

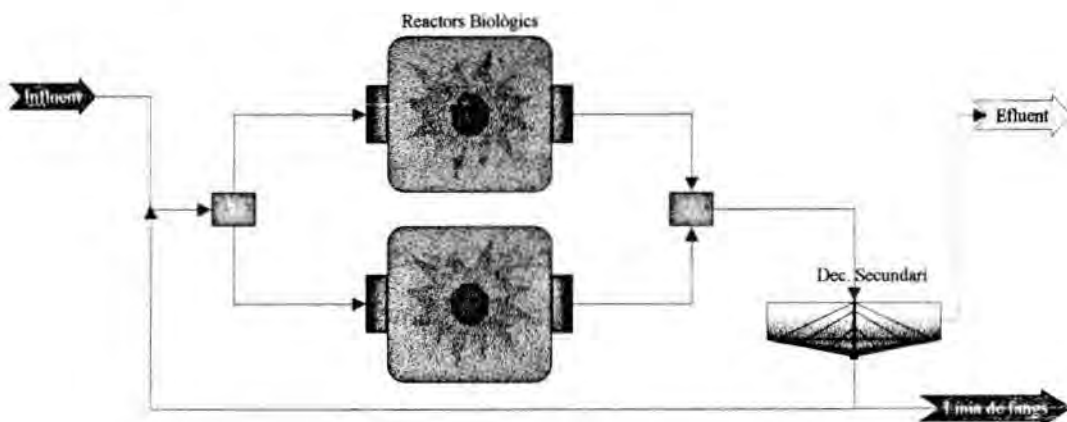


Figura 4.1: Diagrama de procés de la EDAR d'una indústria alimentària sense eliminació de nitrogen.

La depuradora actual consta de dos reactor biològics treballant en sèrie amb una capacitat de 925 m^3 cadascun. L'aportació d'oxigen és per turbines superficials. La decantació secundària és amb un únic decantador secundari de 430 m^3 .

4.2 SITUACIÓ ACTUAL.

4.2.1 Característiques de l'aigua residual.

Les dades disponibles de l'aigua residual generada per la planta es mostren en la taula 4.1.

| Cabal m³/dia | DQO ppm O₂ | SST Ppm | NKT Ppm N | NH₄⁺/NKT - | NO_x⁻ ppm N | SSV/SST - |
|--|--|--------------------------|----------------------------|---|---|----------------------------|
| 900.0 | 2000.0 | 300.0 | 30.0 | 0.1 | 200.0 | 0.9 |

Taula 4.1: Característiques de l'aigua residual.

Una de les característiques que sobten d'entrada en la taula anterior és la gran quantitat de nitrats i nitrits que arriben a la depuradora. Aquest valor tant elevat es fonamenta en les tècniques de neteja i desinfecció utilitzades durant els processos de fabricació.

Si ens fixem en la relació entre l'amoni i el nitrogen total (NH_4^+/NKT) veurem que aquesta és molt petita. això es degut en part a que la major part de nitrogen està format per nitrogen orgànic (greixos, nates i proteïnes) i la quantitat d'amoni és relativament petita.

La DQO de l'aigua és de l'ordre de 2000.0 mg O₂/l, cosa que ens fa pensar en la possibilitat d'assolir una nitrificació – desnitrificació de l'aigua residual. Per un altre costat, les quantitat de NKT poden arribar a valors molt superiors als de la taula 4.1, puntualment poden ser de fins a 60 ppm de N en forma de NKT i de forma excepcional poden arribar fins a les 100 ppm de N en forma de NKT. Aquest valors tant elevats serien com a conseqüència d'abocaments de nata o llet directament a l'aigua residual.

4.2.2 Condicions d'operació.

Les condicions d'operació de la depuradora es mostren en la taula 4.2.

| Característica | Valor |
|---------------------------|----------------------------|
| Recirculació biològica | 2110.0 m ³ /dia |
| Purga de fangs biològics | 90.0 m ³ /dia |
| Consigna d'O ₂ | 1.0 mg O ₂ /l |

Taula 4.2 : Condicions d'operació de la EDAR.

Aquestes condicions d'operació provoquen que es treballi amb una concentració de sòlids en els reactors biològics de l'ordre de 4000 mg/l de SST tal i com s'ha comprovat experimentalment.

4.3 OBJECTIU DE LES SIMULACIONS.

L'objectiu de l'estudi és determinar les possibilitats d'assolir una nitrificació - desnitrificació (N/D) de l'aigua residual. Per a fer-ho s'estudien dues possibilitats: a) assolir la N/D sense ampliar la planta actual i b) definir un nou diagrama de procés per assolir la N/D. En la taula 4.3 es mostren les concentracions màximes dels compostos nitrogenats que es volen assolir.

| Característica | Concentració màxima |
|--|---------------------|
| NKT | 10.0 mg N/l |
| NO _x ⁻ (Nitrats + Nitrits) | 5.0 mg N/l |
| Nitrogen total | 15 mg/l |

Taula 4.3: Limitacions imposades per a la N/D de la EDAR.

4.4 MODELITZACIÓ DE LA PLANTA.

La modelització de la depuradora inclourà els dos reactors biològics i el decantador secundari. Utilitzarem la llibreria CNP del GPS-X. De fet es podria utilitzar la CN donat que no desitgem eliminar el fòsfor, però els models disponibles en la llibreria CN no tenen en compte el procés d'hidròlisi del nitrogen orgànic a amoni i en el nostre cas això ens provocaria errors en els càlculs corresponents.

S'utilitzaran per a les simulacions els valors típics descrits en la bibliografia per a la simulació de la planta. L'únic paràmetre que ajustarem d'una forma aproximada serà el rendiment dels organismes heterotròfics (Y_{het}) per tal d'ajustar el valor de la concentració de sòlids en els reactors biològics.

L'ajust d'aquesta única variable s'efectua amb una anàlisi de sensibilitat del paràmetre. Es defineixen les condicions d'operació de la planta segons les expressades en la taula 4.2 i s'ajusta el corrent d'entrada a partir de les dades de la taula 4.1. L'anàlisi de sensibilitat (figura 4.3) s'efectua representant el rendiment dels organismes heterotròfics (Y_{het}) en front de les concentracions de sòlids en suspensió dels reactors biològics. Els valors presentats corresponen a l'estat estacionari doncs tant les condicions d'operació com l'entrada es mantenen constants. El valor obtingut per a Y_{het} és de 0.45.

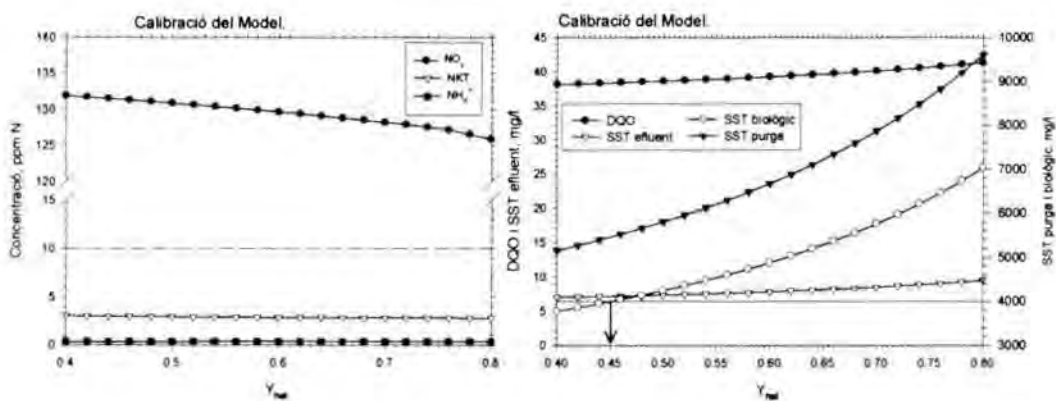


Figura 4.3: Calibració del rendiment dels organismes heterotròfics (Y_{het})

4.6 SIMULACIONS.

Tant si es modifiquen les condicions d'operació de la planta actual com si s'opta per una ampliació de la EDAR, el diagrama de flux de la planta s'hauria de modificar. L'esquema de N/D proposat és de un reactor anaerobi seguit del reactor aerobi i amb dues recirculacions: una primera des de la sortida del reactor aerobi a

l'entrada del anaerobi; i una segona, la recirculació biològica des del decantador secundari fins a l'entrada de l'anaerobi (figura 4.4) semblaria l'adequat.

Totes les simulacions es realitzen mantenint les condicions d'operació actual i les característiques de l'entrada constants. Donat que l'estudi s'efectua en condicions constants, els resultats es presenten coma anàlisis de sensibilitat d'un dels paràmetres en front de les característiques del corrent de sortida.

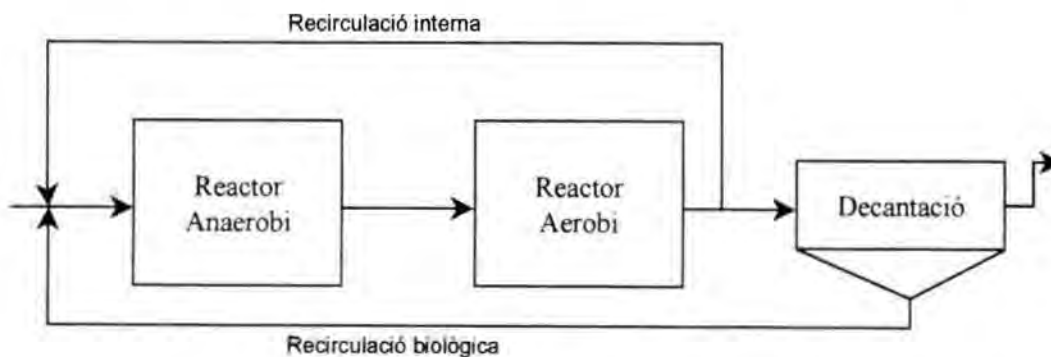


Figura 4.4 : Diagrama d'un procés de Nitrificació - Desnitrificació.

4.6.1 Utilització de les instal·lacions actuals.

La N/D de l'aigua residual amb les instal·lacions actuals passaria per crear una zona anaeròbia a l'inici de cadascun dels reactors biològics existents i la creació d'un nou corrent de recirculació (recirculació interna, figura 4.4) des de la sortida dels biològics fins a l'entrada del mateix. La dificultat radicaria en mantenir les dues zones aïllades per tal de que les turbines de la zona aeròbica no aportessin oxigen a l'inici del reactor. Aquesta nova configuració seria possible donada la geometria i disposició actual dels reactors biològics, de forma rectangular i amb dues turbines d'aeració.

La concentració de NKT a l'entrada presenta variacions important durant els dies en que s'efectuen cicles de neteja. Per tal d'assegurar-nos que la planta podrà funcionar correctament en la major part dels dies, modificarem les concentracions de les formes de nitrogen a l'entrada fins a 60 mg N/l de NKT i fins a 250 mg N/l la concentració de nitrats i nitrits (NO_x^-).

El diagrama de N/D proposat depèn de dos paràmetres: el cabal de recirculació interna i el percentatge respecte al volum total disponible de reacció biològica destinat a desnitrificar (volum anaerobi). S'efectuen anàlisis de sensibilitat de la recirculació interna en front de les característiques de l'efluent utilitzant el 25 i el 50% del volum total disponible en condicions anaeròbies. Els resultats es mostren en les figures 4.5 i 4.6 per a un 25 i un 50% de volum anaerobi respectivament.

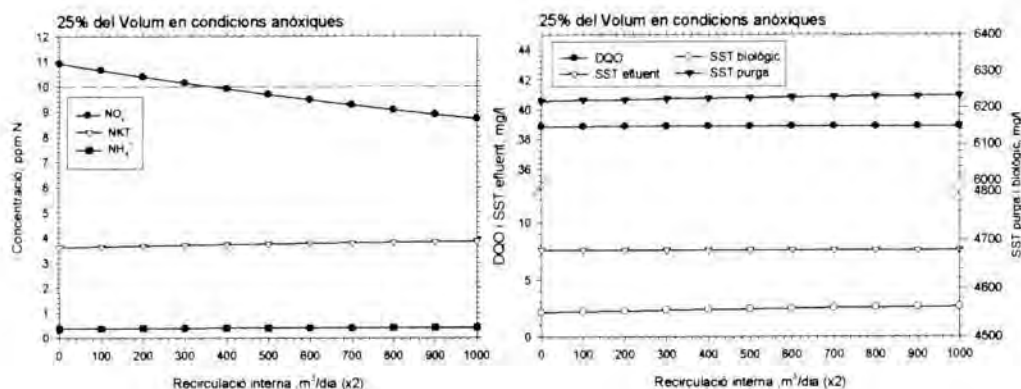


Figura 4.5 : Anàlisi de sensibilitat de la recirculació interna amb un 25% de volum anaerobi.

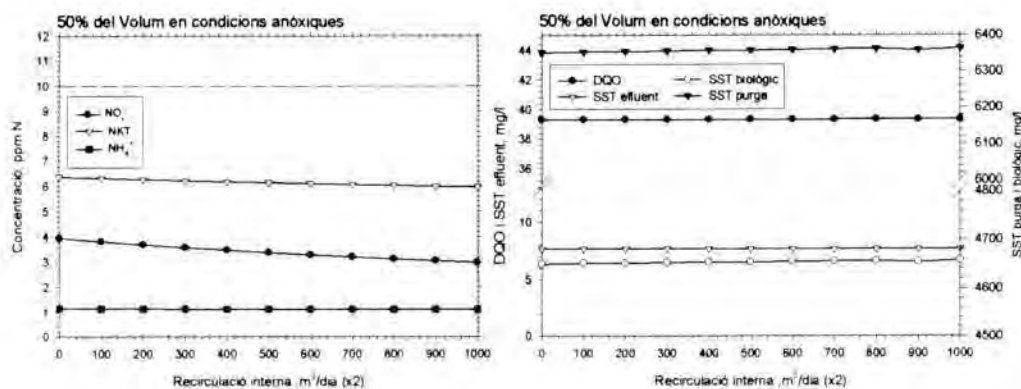


Figura 4.6 : Anàlisi de sensibilitat de la recirculació interna amb un 50% de volum anaerobi.

Tant si utilitzem un 25% com un 50% del volum disponible per a la desnitrificació podem veure com les característiques referides a la matèria orgànica (DQO) i els sòlids en suspensió totals (SST) no experimenten variacions importants en l'efluent de sortida. Les diferències apareixen en els compostos nitrogenats. Amb un 25% (figura 4.5) tant l'amoni com en NKT es mantindria per sota de les 5.0

ppm de N, es a dir, el volum aerobi seria suficient com per nitrificar fins a un nivell acceptable. Les concentracions de nitrats i nitrits sense recirculació interna s'assoleixen valors baixos de fins a 11 ppm de N respecte a les concentracions de l'entrada (250 mg N/l) però sense assolir les 5.0 ppm de N fixades com a objectiu. Amb el 50% del volum en condicions anaeròbies les concentracions de nitrats i nitrits es mostren inferiors a les 5.0 ppm de N, però el nitrogen total (NKT) experimenta un augment fins a les 6.2 ppm de N, assolint l'objectiu de no superar el limit de 10 mg de N/l de NKT.

Sense necessitat d'efectuar una ampliació de la planta, les possibilitats d'assolir una N/D de la planta semblen possibles. L'elecció d'aquesta alternativa ens hipotecaria el sistema de tractament en el cas de que la planta rebés un cabal d'entrada més elevat i/o tinguéssim una punta de NKT a l'entrada superior als 60 mg N/l de NKT com ja es presenta en l'actualitat de forma esporàdica.

La primera opció d'utilitzar només un 25% del volum en condicions anaeròbies, implicaria realitzar recirculacions internes excessivament elevades per assolir els límits fixats i per tant ja es descarta donat l'alt cost energètic que implicaria.

4.6.2 Modificació de la EDAR. Ampliació.

L'opció a la modificació de les condicions d'operació de la planta és l'ampliació d'aquesta amb un nou reactor biològic que operi en condicions anaeròbies situat abans del reactor aerobi. EL diagrama de la planta modificada seria el presentat en la figura 4.7.

Es disposa novament de dues variables a optimitzar: el volum del reactor anaerobi i el cabal de recirculació interna. Es procedeix inicialment a la determinació del volum anaerobi necessari per assolir la N/D sense necessitat d'utilitzar la recirculació interna i amb una concentració de NKT a l'entrada de 60 mg N/l.

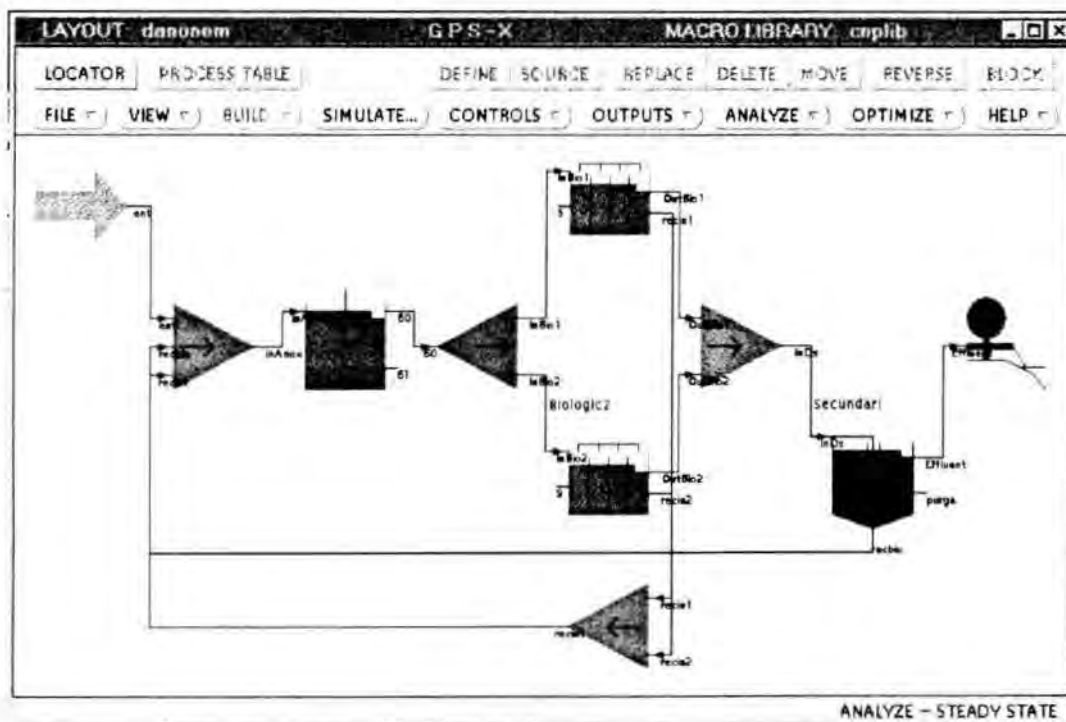


Figura 4.7 : Diagrama de la EDAR modificada en el GPS-X.

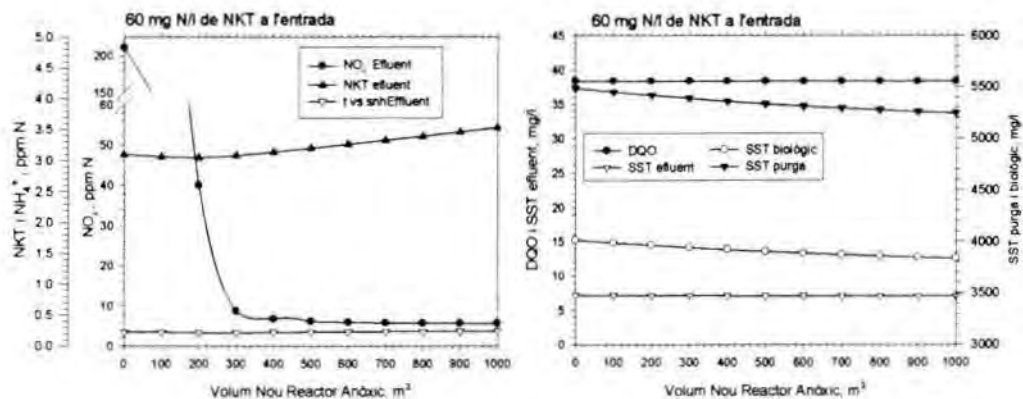


Figura 4.8 : Anàlisi de sensibilitat del volum del reactor anaerobi amb 60 mg N/l en forma de NKT a l'entrada.

En la figura 4.8 es presenta l'anàlisi de sensibilitat del volum del nou reactor anaerobi en front de les concentracions de l'efluent. La concentració del nitrogen oxidat (nitrats i nitrits) evoluciona des de les 220 ppm sense reactor anaerobi fins a valors de 5-7 mg N/l en forma de NO_x⁻ obtinguts amb un reactor anaerobi de 1000 m³. A més s'observa un descens en forma exponencial i així, fins els 300 m³ el descens és molt pronunciat però a partir dels 600 m³ el descens ja segueix una

asíntota horitzontal. Les formes de nitrogen reduïdes (NKT i NH_4^+) ja experimenten valors inferiors als 5.0 mg N/l i per tant el volum de nitrificació (reactor aerobi) és suficient.

Ara bé, tot i que a partir del diagrama de sensibilitat de la figura 4.8 es podria escollir un volum de reactor anaerobi, ens caldria conèixer el comportament de la EDAR en el moment en que la concentració de NKT a l'entrada es trobés en condicions extremes de 100 mg N/l de NKT. En la figura 4.9 es presenta l'anàlisi de sensibilitat del volum anaerobi considerant una concentració de 100.0 mg N/l de NKT a l'entrada i sense recirculació interna.

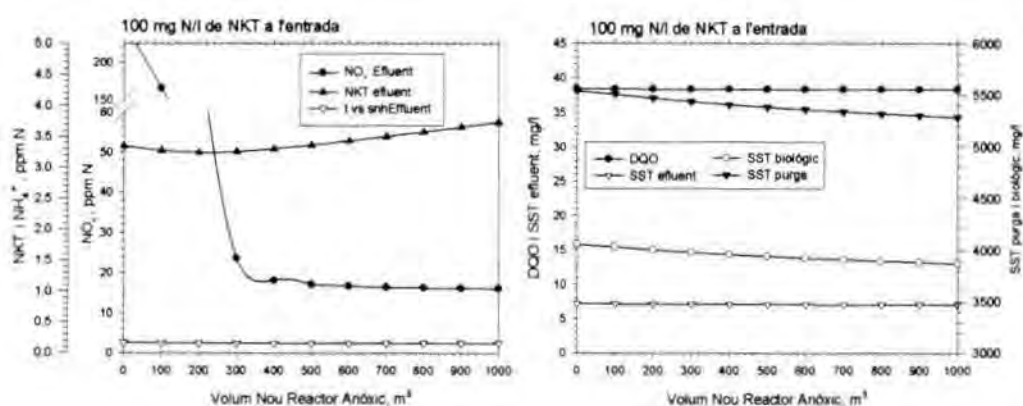


Figura 4.9 : Anàlisi de sensibilitat del volum anaerobi amb una concentració de 100.0 mg N/L de NKT a l'entrada.

Prenguem com a punt de referència els 600 m³ de volum del reactor anaerobi, s'observa com per a concentracions de 60 mg N/l de NKT a l'entrada es poden assolir concentracions de nitrats + nitrits inferiors als 5.0 mg N/l, però que en situacions de 100 ppm de NKT, el volum necessari per assolir concentracions inferiors a 5.0 ppm seria molt elevat donat que amb 1000 m³ la concentració de nitrats i nitrits assolida és de 16 ppm i la tendència a disminuir amb el volum és molt lenta. La necessitat de disposar d'una recirculació interna per assolir l'objectiu proposat es fa constar.

En les figures 4.10 i 4.11 es mostren els anàlisis de sensibilitat del cabal de recirculació interna considerant una concentració d'entrada de 60 i 100 mg N/l respectivament.

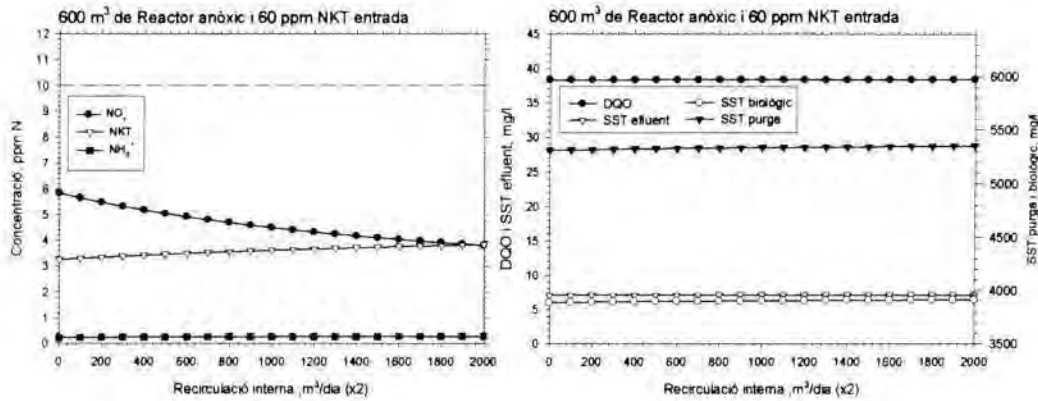


Figura 4.10 : Anàlisi de sensibilitat de la recirculació interna amb 60 mg N/l de NKT a l'entrada i un volum de 600 m³.

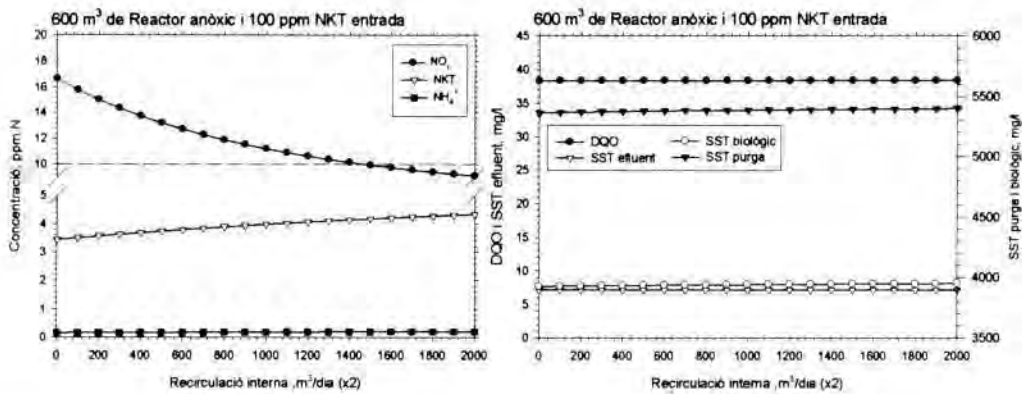


Figura 4.11 : Anàlisi de sensibilitat de la recirculació interna amb 100 mg N/l de NKT a l'entrada i un volum de 600 m³.

Per a una concentració de 60 mg N/l de NKT a l'entrada i amb una recirculació interna de 500 m³/dia per a cadascun dels reactors el valor de la concentració de nitrogen oxidat obtingut es propera als 5.0 mg N/l. Ara bé, amb concentracions de NKT de 100 ppm de nitrogen a l'entrada, amb un cabal de recirculació de 2000 m³/dia no s'arriben a assolir les 5.0 ppm de nitrats i nitrits.

Així, amb un volum de 600 m^3 , les necessitats d'establir recirculacions internes hauria de ser una pràctica habitual en el funcionament de la EDAR. El funcionament habitual de la recirculació interna implicaria uns costos d'explotació i manteniment elevats. Es planteja l'opció de treballar amb un volum de reactor anaerobi superior per tal de limitar el funcionament de les bombes de recirculació.

Part d'aquests costos de funcionament es podrien reduir si s'adopta un volum anaerobi superior. S'escullen 1000 m^3 de reactor anaerobi i s'analitza la resposta del sistema en les condicions més extremes. En la figura 4.12 es mostra l'anàlisi de sensibilitat de la recirculació interna amb un reactor de 1000 m^3 .

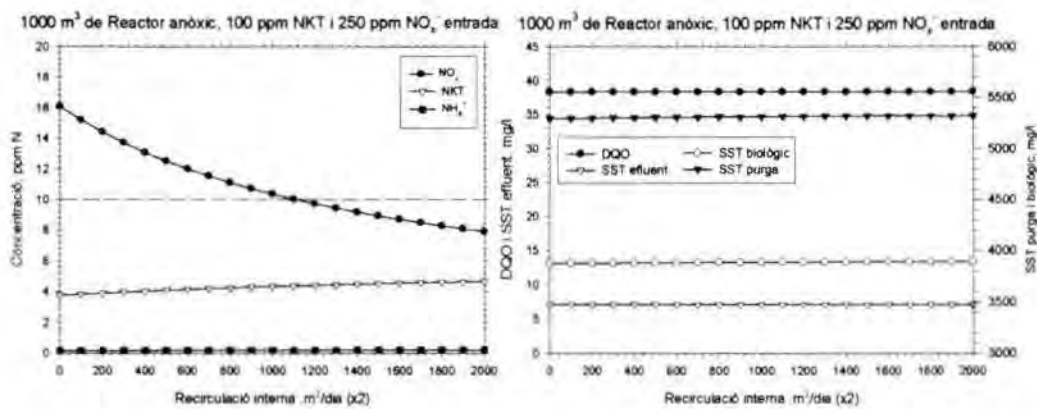


Figura 4.12 : Anàlisi de sensibilitat del cabal de recirculació interna per a una concentració de 100 mg N/l en forma de NKT i 1000 m^3 de reactor anaerobi.

Finalment, donat que la major part dels dies l'influent no disposa de concentracions molt elevades de NKT, s'efectua una anàlisi de sensibilitat de la concentració de NKT a l'influent utilitzant un reactor de 1000 m^3 i sense recirculació interna (figura 4.13).

De la figura 4.13 es pot concloure que per a concentracions de NKT a l'entrada inferiors a 50.0 ppm no es necessària la recirculació interna per assolir concentracions de nitrats i nitrits inferiors a les 5.0 ppm .

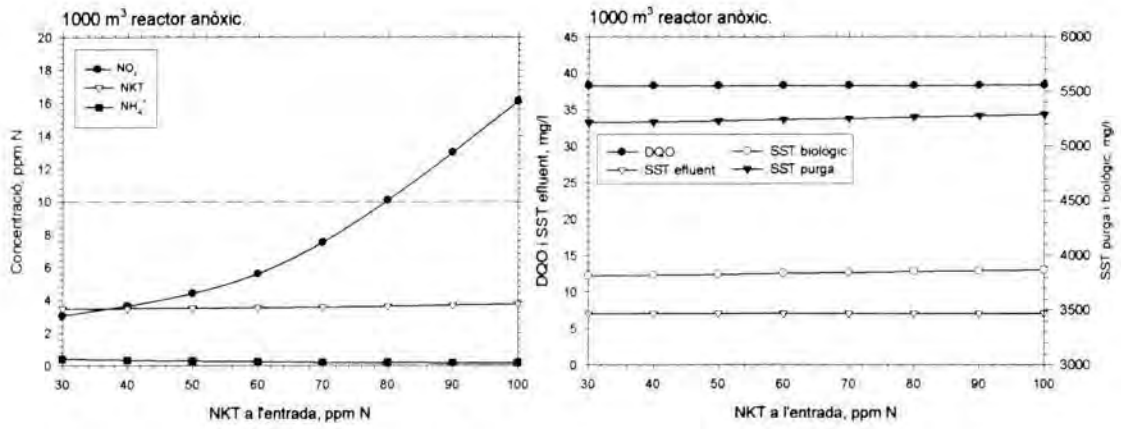


Figura 4.13 : Anàlisi de sensibilitat del NKT a l'entrada per un reactor anaerobi de 1000 m³ sense recirculació interna

5. AMPLIACIÓ D'UNA EDAR. LLORENÇ DEL PENEDÈS.

5.1 DESCRIPCIÓ DE L'EDAR.

La edar de Llorenç del Penedès és una depuradora que funciona en unes condicions poc fiables degut al seu disseny inicial i que en l'actualitat s'ha plantejat la possibilitat d'efectuar-ne una ampliació per a millorar-ne el rendiment. Tracta en l'actualitat un cabal mitjà diari de 450 m^3 i la presència d'una indústria càrnica que aboca les seves aigües residuals al col·lector que arriba a l'estació depuradora fa que les càrregues orgàniques i de nitrogen que li arriben siguin valors molt lluny dels valors típics d'una aigua residual urbana.

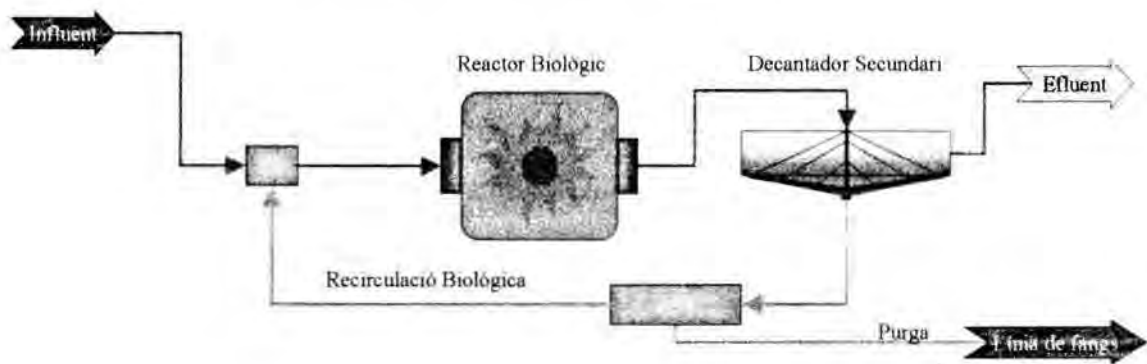


Figura 5.1: Diagrama de la edar de Llorenç del Penedès.

En la figura 5.1 es mostra la diagrama de procés que presentava inicialment la EDAR. No disposa de decantació primària i l'aigua accedeix directament al tanc de aeració o reactor biològic. El reactor biològic disposa d'un volum de 300 m^3 i l'aportació d'aire és per mitjà de turbines amb una potència màxima de 18.3 kW . La decantació secundària és un dels punts més febles de la edar, consta de un decantador de base quadrada amb una superfície de 25 m^2 i un volum màxim de 100 m^3 .

5.2 SITUACIÓ ACTUAL.

Degut a les característiques de l'influent i a les condicions d'operació, la edar de Llorenç del Penedès presentava una gran quantitat de problemes que es podrien

resumir bàsicament en l'aparició de bacteris filamentosos provocant un búlqing important i en la desnitrificació salvatge en el decantador degut a la formació de nitrats en la zona aeròbica (*rising*). Les purgues actuals també són molt petites i fan que a més de disposar d'una edat del fang elevada que afavoreix la nitrificació, es treballi a concentracions de biomassa en el reactor aeròbic molt elevades.

5.2.1 Característiques de l'aigua residual.

Un dels punts més importants de Llorenç del Penedès és la característica del seu influent. A partir d'una campanya analítica es va determinar el perfil diari mitjà tant del cabal (figura 5.2) com de les característiques de l'aigua residual a depurar (figura 5.3) on ja es podrien apreciar els valors elevats de DQO i NKT a l'entrada. Així mateix s'observa la presència d'una punta horària important deguda a la presència de l'escorxador proper. Tot i disposar de puntes horàries importants, en la gràfica de les fraccions de la figura 5.3 es pot veure com les principals relacions estequiomètriques de l'aigua residual es mantenen en valors més o menys constants.

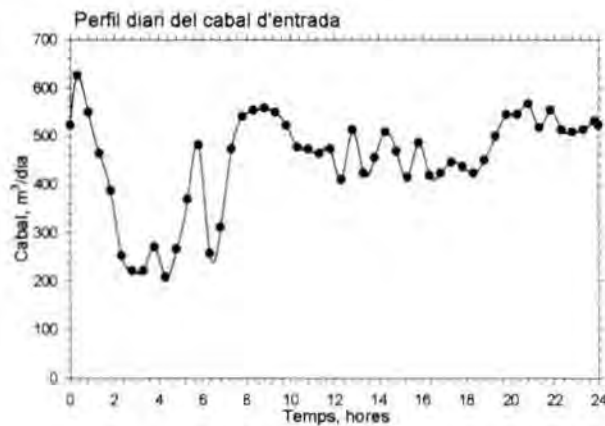


Figura 5.2: Perfil del cabal d'entrada de la edar de Llorenç del Penedès

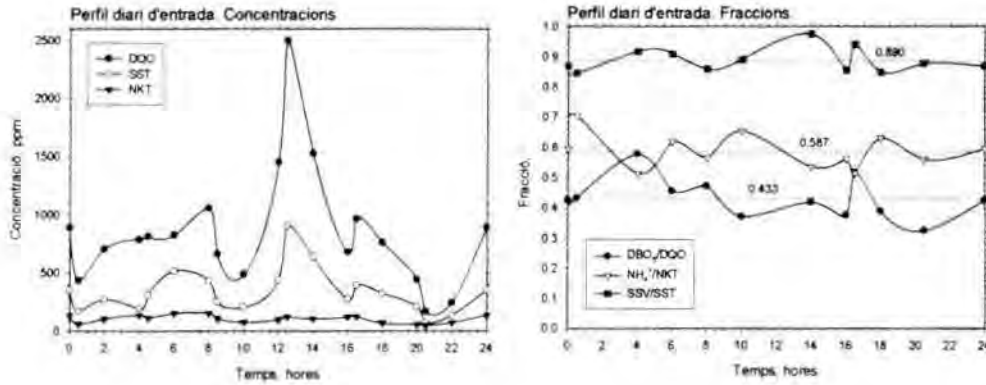


Figura 5.3: Característiques de l'aigua residual d'entrada de la edar de Llorenç del Penedès.

Els valors mitjans diaris presentats en les figures 5.2 i 5.3 es mostren en la taula 5.1.

| | | | | | |
|--------------|--------------------------|----------------------------|------------|---------------------------------------|-------|
| Cabal | 450 m ³ /dia | NKT | 105 mg N/l | NH₄⁺/NKT | 0.587 |
| DQO | 850 mg O ₂ /l | DBO₅/DQO | 0.433 | SSV/SST | 0.89 |
| SST | 340 mg/l | | | | |

Taula 5.1: Valors mitjans diaris de l'aigua residual de la edar de Llorenç del Penedès.

Dins dels sòlids en suspensió que arriben amb l'aigua residual cal tenir present la presència d'una quantitat de microorganismes no menyspreable d'aproximadament uns 200 mg/l, especialment heterotròfics. Aquesta presència de microorganismes a l'entrada fa que els criteris actuals de disseny de edars puguin presentar petites diferències respecte al comportament final de la planta.

5.2.2 Condicions d'operació.

Les condicions d'operació de la edar abans de les modificacions es basarien en una recirculació biològica igual al valor mig del cabal d'entrada de 450 m³/dia. La purga s'efectua en discontinu cada tres dies purgant 30 m³ de fang del decantador secundari. L'oxigen a la bassa aeròbica es controla en l'entorn de 1.0 ppm d'oxigen mitjançant la turbina superficial.

5.3 OBJECTIU DE LES SIMULACIONS.

Arran dels problemes de funcionament de la edar, es va plantejar la seva ampliació a fi i efecte de que la depuradora funcionés dins dels marcs establerts per la llei. La gran quantitat de problemes que presenta, faria pensar en la construcció d'una nova edar, però tot i així es poden analitzar les possibles modificacions del sistema actual per assolir un nivell de depuració acceptable.

Les modificacions a fer dins de la edar les podríem encaminar bàsicament cap a dos punts ben definits:

- Funcionament de la planta evitant la Nitrificació
- Funcionament amb Nitrificació-Desnitrificació.

Donat que la localització de la edar és inicialment dins d'una zona qualificada com a no sensible, l'eliminació de nutrients en principi no seria necessària. L'estudi d'ampliació es realitzarà inicialment intentant evitar la nitrificació de l'amoni present en l'aigua residual, tot i que en posterioritat s'estudiarien quines haurien d'ésser les ampliacions per assolir una N/D total de l'aigua residual.

5.4 MODELITZACIÓ DE LA PLANTA.

La llibreria utilitzada per a la simulació de la edar de Llorenç del Penedès ha estat la CN2. Escollirem aquesta ja que inclou com a variable d'estat l'alcalinitat. En la planta de Llorenç del Penedès, l'alcalinitat és un factor limitant per tal de nitrificar tot el nitrogen orgànic i l'amoni que entra amb l'aigua residual.

5.5 CALIBRACIÓ.

Les dades disponibles per a calibrar les constants cinètiques i estequiomètriques del model no són suficients com per a obtenir un ajust prou raonable. Es fan servir

els valors típics de les constants cinètiques referenciades en la bibliografia i es comparen els resultats obtinguts amb els reals de la planta.

Un dels punts que caldrà comprovar serà la nitrificació salvatge en el decantador. Tot i que en el model no podem predir un procés de *rising*, sí que es pot determinar la desnitrificació en el decantador secundari. Es per això que s'utilitza un model de flux de matèria amb reacció biològica per al decantador secundari.

5.6 PROPOSTA A. FUNCIONAMENT EVITANT LA NITRIFICACIÓ.

Per evitar el creixement dels microorganismes nitrificants treballarem amb una edat del fang inferior a 4 dies i amb concentracions d'oxigen baixes per evitar-ne el desenvolupament.

Per evitar el creixement dels bacteris filamentosos, s'ha vist que l'ús de selectors a l'entrada del procés eviten en part la proliferació d'aquestes. Es per això que l'aigua residual a depurar accedirà primerament al selector on es posarà en contacte, durant un període de temps curt, amb la biomassa recirculada. El temps de residència en el selector ha de ser relativament baix per tal de que no es produeixi la degradació de la matèria orgànica. En realitat, el que tenim és un procés d'absorció de la matèria orgànica en els flocs de biomassa. Posteriorment, en el tanc d'aeració, en tindrà lloc la degradació.

A fi i efecte de que el selector funcioni correctament, la biomassa que hi accedeix ha de tenir unes condicions determinades. Com que el reactor biològic treballarà a nivells d'oxigen baixos (inferiors a 1.0 ppm O₂), es disposarà de un tanc de regeneració on el fang recirculat es sotmetrà a concentracions d'oxigen elevades per acabar d'eliminar tota la matèria orgànica que es trobi absorbida en el fang. En la figura 5 4 es mostra el diagrama d'aquesta proposta en el GPS-X.

nitrogenada (NKT, NH_4^+ i NO_x^-) a la sortida de cadascuna de les unitats del nou diagrama de la edar de Llorenç del Penedès.

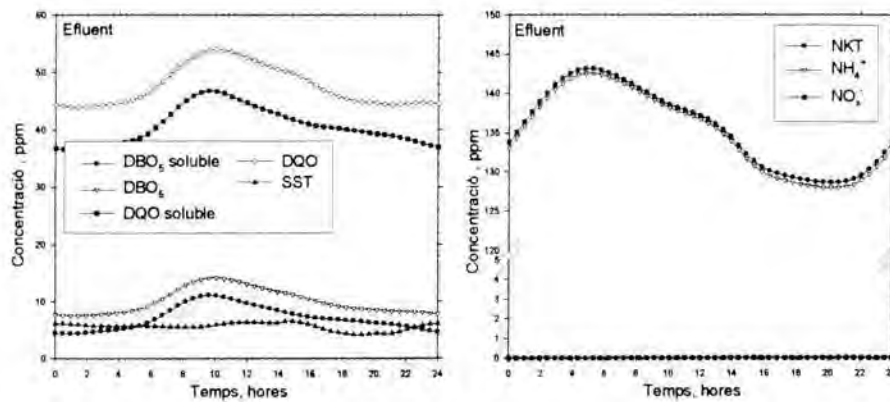


Figura 5.5: Proposta A. Característiques de l'aigua residual depurada.

Com que en totes les unitats, excepte en l'efluent, la quantitat de biomassa que conté el corrent de sortida és molt elevada, el valor tant de la DQO com de la DBO₅ inclourien els sòlids en suspensió. És per això que es mostren únicament els valors de DQO i DBO₅ solubles.

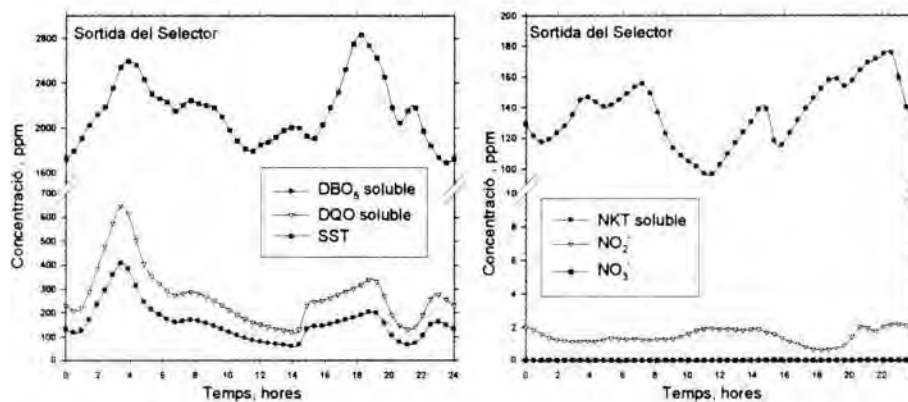


Figura 5.6: Proposta A. Característiques de la sortida del selector.

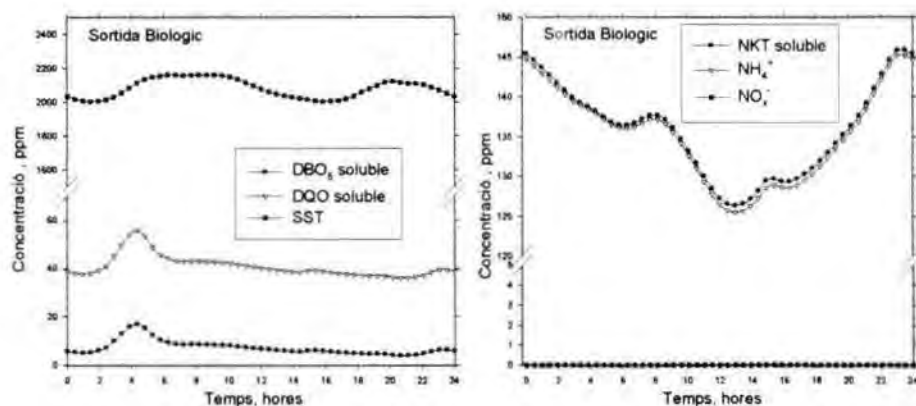


Figura 5.7: Proposta A. Característiques de la sortida del reactor aeròbic.

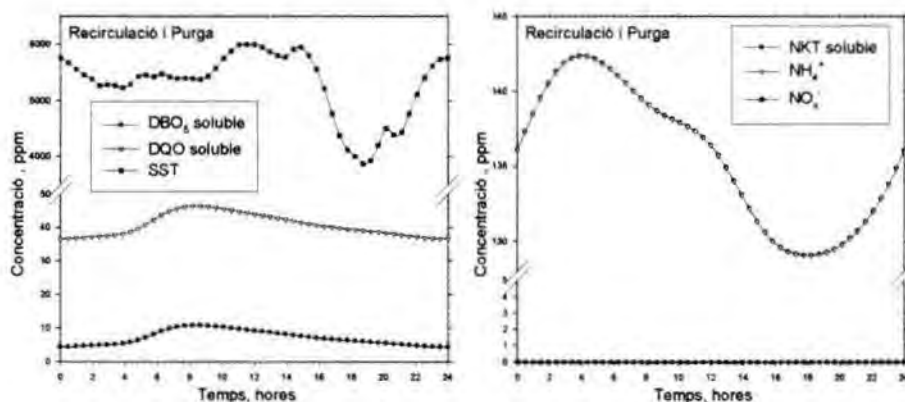


Figura 5.8: Proposta A. Característiques de la recirculació i purga.

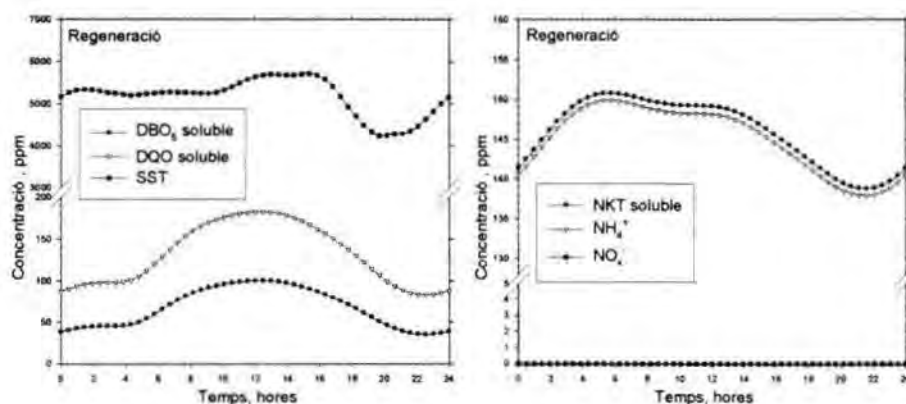


Figura 5.9: Proposta A. Característiques de la sortida del tanc de regeneració.

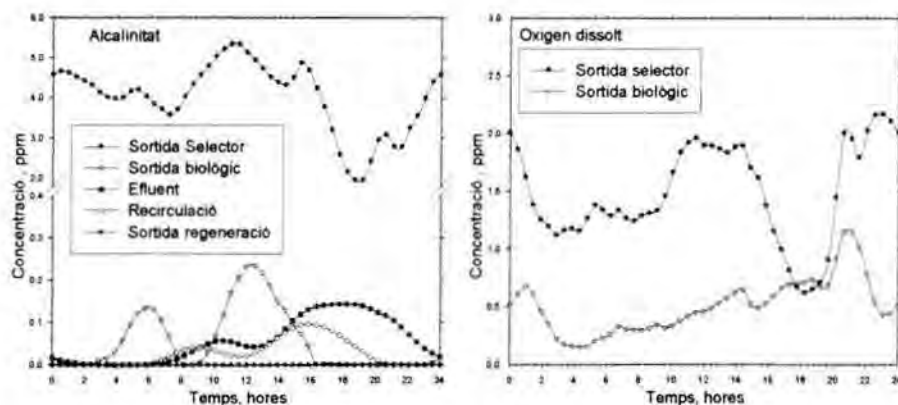


Figura 5.10: Proposta A. Perfils d'alcalinitat i oxigen dissolt.

Amb les condicions de la proposta A assolim l'objectiu d'evitar la nitrificació de les diferents formes de nitrogen que entren amb l'aigua residual (amoni i nitrogen orgànic). L'eliminació de la matèria orgànica s'aconsegueix amb relativa facilitat.

Tot i així, ens podríem plantejar ara quin seria el funcionament de la planta si a partir d'aquestes noves modificacions ens plantejàssim la possibilitat d'efectuar una eliminació de nutrients (N/D).

5.7 PROPOSTA B. A PARTIR DE LES MODIFICACIONS DE LA PROPOSTA A: AVALUAR LES POSSIBILITATS DE N/D.

La nitrificació de l'amoni deguda als organismes autotròfics es pot assolir amb edats del fang superiors a 5-6 dies i amb nivells d'oxigen en el tanc d'aeració superiors a 1.0 ppm d'O₂. Si després volem desnitrificar haurem de disposar d'una zona anaeròbia on els nitrats formats en la zona aeròbica passin a nitrogen gas mitjançant els organismes heterotròfics.

La necessitat de disposar de zones aeròbiques o anaeròbies portaria a disposar de dos reactor treballant en les esmentades condicions. Tot i així, es poden intentar obtenir les dues situacions en un mateix reactor tal i com es mostra en la figura 5.11. Aquesta disposició en el mateix reactor es podria efectuar de dues formes:

- A Dividir el reactor físicament amb l'ajut d'un sistema de recirculació.
- B Temporalitzar les turbines amb seqüències d'engegada i parada.

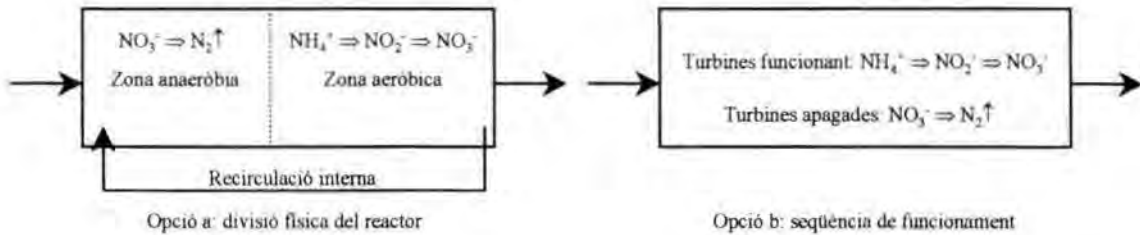


Figura 5.11: Nitrificació – Desnitrificació amb un únic reactor.

L'opció més fàcil d'aplicar seria l'establiment de seqüències de funcionament per a les turbines (opció b de la figura 5.11). L'establiment d'un funcionament fraccionat de les turbines es possible sempre i quant l'entrada de la planta es mantingui més o menys constant. Donada la presència de puntes en el perfil diari, seria aconsellable instal·lar un dipòsit inicial que actues de pulmó regulador no ja del cabal d'entrada sinó de les característiques pròpies de l'influent (DQO, DBO₅, NKT, ...). La capacitat d'aquest tanc seria la suficient com per a retenir el volum diari de tractament (500 m³). A més, per a millorar-ne les prestacions, l'entrada també seria de forma intermitent coincidint amb el període de funcionament de les turbines (nitrificació). Un esquema de funcionament en aquestes condicions es pot veure en la taula 5.2.

| Temps (minuts) | Cabal d'entrada (m3/dia) | Funcionament turbines | Recirculació | Purga |
|----------------|--------------------------|-----------------------|--------------|-------|
| 0 – 30 | 900.0 | Si. Nitrificació | Si | Si |
| 30 - 60 | 0.0 | No. Desnitrificació | Si | No |

Taula 5.2: Exemple de funcionament temporalitzat de les turbines.

La configuració segons la taula 5.2 en un reactor de 300 m³ seria equivalent a disposar de dos reactor de 150 m³ cadascun treballant en condicions aeròbiques i anaeròbies respectivament. De fet aquest esquema de funcionament s'assemblaria

al funcionament de un sistema de llots actius en discontinu (*Sludge Batch Reactor - SBR*). De fet la relació entre el temps de funcionament aeròbic i anaerobi serà equivalent a la relació de volums aerobis i anaerobis segons s'expressa en l'equació 5.1.

$$\frac{T_{aeròbic}}{T_{anaerobi}} = \frac{V_{aeròbic}}{V_{anaerobi}} \quad \text{Eq. 5.1}$$

5.7.1.1 Simulació de la temporització de turbines.

Per a determinar les capacitats de N/D de la planta en les noves condicions s'efectuen simulacions amb un 100%, 75%, 50% i 25% de funcionament aerobi partint d'una purga de 15 m³/dia i una recirculació de 0.55 vegades el cabal d'entrada. Amb la purga de 15 m³/dia s'assoleixen edats del fang de l'ordre de 8 dies, suficients per assolir la nitrificació.

En la figura 5.12 es mostra la qualitat de l'efluent si es treballés en condicions aeròbiques de forma continuada, sense aturar les turbines. Fixant-nos en els compostos nitrogenats es pot veure com les concentracions de NKT i amoni són inferiors a 4.0 mg N/l, és a dir, s'assoleix la nitrificació completa de l'aigua residual. Si observem en la mateixa figura les espècies oxidades de nitrogen (nitrats i nitrits) s'observa com la major part del nitrogen es troba en la forma més oxidada és a dir nitrats. A partir d'aquí es pot concloure que amb el volum inicial de 300 m³ és possible nitrificar sense gaires problemes tot el nitrogen de l'influent. Ara bé, si temporitzem les turbines amb un funcionament del 75% del temps (figura 5.13) podem veure com la concentració de les espècies de NKT i amoni augmenta fins a valors per sobre dels 10.0 mg N/l i que en canvi els nitrats no arriben a superar el 30.0 mg/l. Successivament, des de la figura 5.12 fins a la figura 5.15 s'observa com la concentració de NKT i amoni present en l'efluent va augmentat i la de nitrats disminuint de forma progressiva sense arribar en cap cas a un valor de N/D suficient.

Per assolir un efluent amb N/D completa caldrà augmentar el volum del reactor i anar estudiant els diferents temps de funcionament de les turbines.

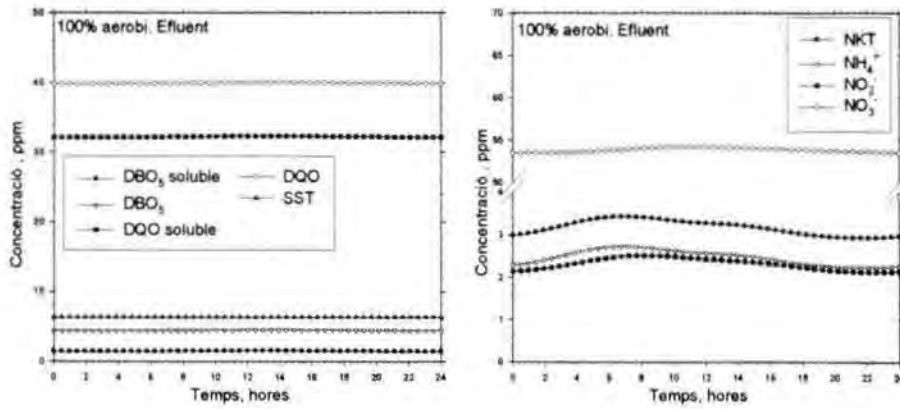


Figura 5.12: funcionament en condicions aeròbiques i amb un tanc pulmó a l'entrada.

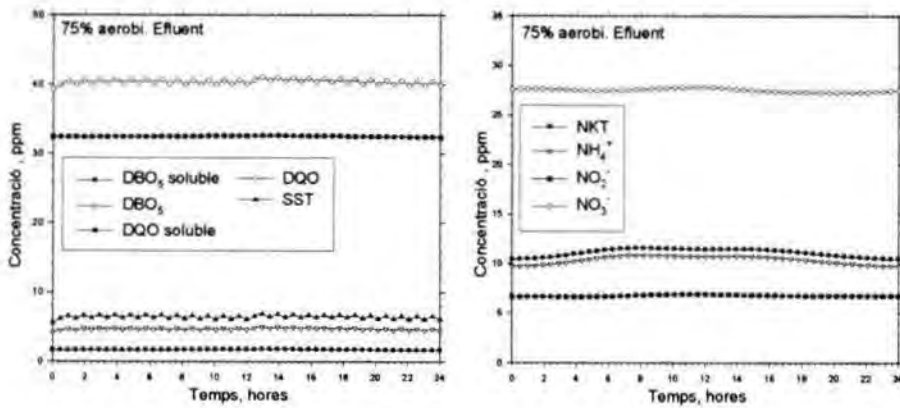


Figura 5.13: Temporització de turbines. 45 minuts funcionament + 15 minuts aturades.

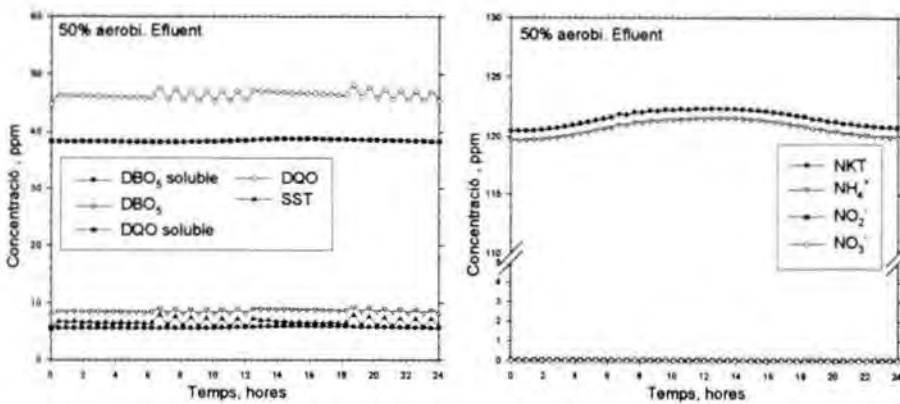


Figura 5.14: Temporització de turbines. 30 minuts funcionament + 30 minuts aturades.

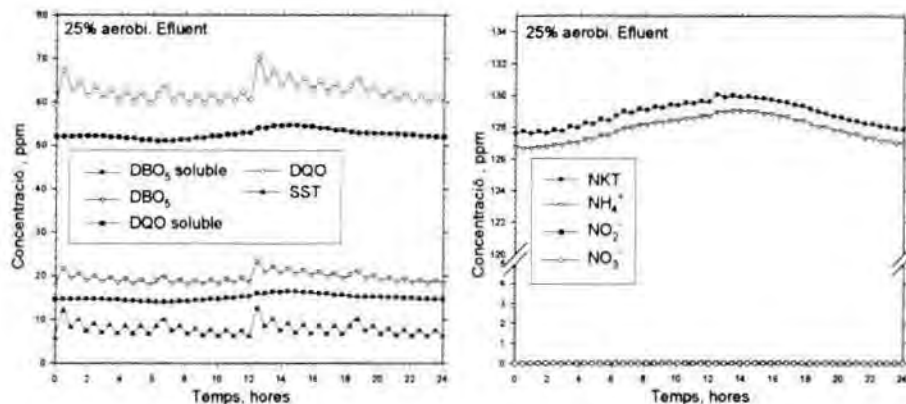


Figura 5.15: Temporització de turbines. 15 minuts funcionament + 45 minuts aturades.

5.7.1.2 Càlcul del volum necessari per a N/D.

Si prenem com a punt de referència una concentració de NKT inferior a 10 ppm i la de nitrats + nitrits de 5.0 ppm per a considerar que s'assoleix una eliminació de nutrients, a partir de la figura 5.13 amb un 75% de comportament aerobi, podem concloure que el volum mínim per nitrificar l'aigua residual és de 250 m³. Tot i així, si volem desnitrificar tant sols disposariem de 50 m³, insuficient per assolir nivells baixos de nitrats a la sortida. Per assolir la N/D completa de l'efluent ens cal augmentar el volum del reactor biològic i modificar-ne la seqüenciació de les turbines.

| V aerobi | V anaerobi | V total | Temps aerobi | Temps anaerobi |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------|
| 250 m ³ | 100 m ³ | 350 m ³ | 45 min. | 17 min. |
| 250 m ³ | 150 m ³ | 400 m ³ | 37 min. | 23 min. |
| 250 m ³ | 200 m ³ | 450 m ³ | 33 min. | 27 min. |
| 250 m ³ | 250 m ³ | 500 m ³ | 30 min. | 30 min. |
| 300 m ³ | 300 m ³ | 600 m ³ | 30 min. | 30 min. |
| 300 m ³ | 350 m ³ | 650 m ³ | 27 min. | 33 min. |
| 300 m ³ | 400 m ³ | 700 m ³ | 25 min. | 35 min. |

Taula 5.3: Descripció dels volums simulats i temps de funcionament de turbines.

S'efectuen simulacions per a diferents volums del reactor, tal i com es mostra en la taula 5.3, i les resultats es mostren des de la figura 5.16 fins a la figura 5.22.

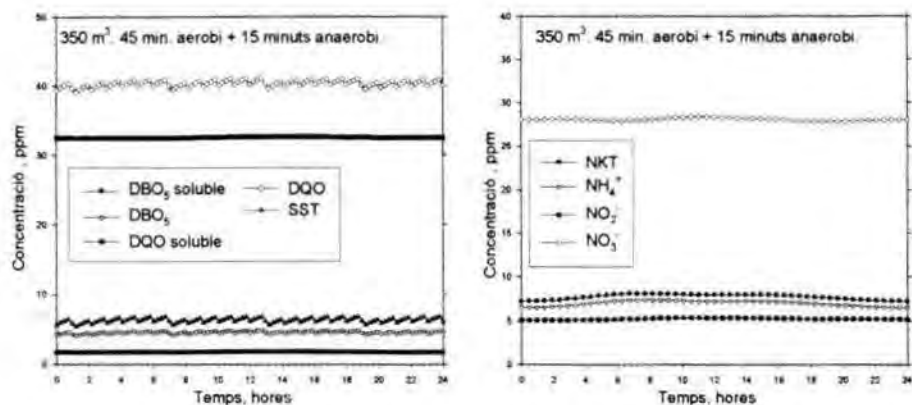


Figura 5.16: Característiques de l'efluent amb 350 m³ de reactor.

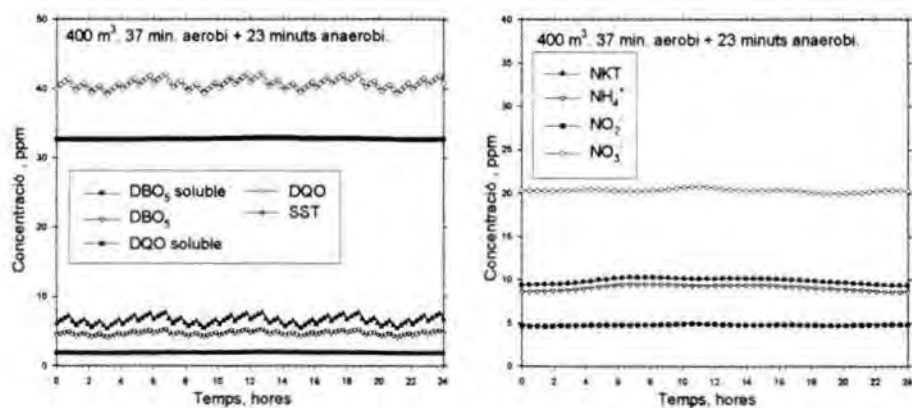


Figura 5.17: Característiques de l'efluent amb 400 m³ de reactor.

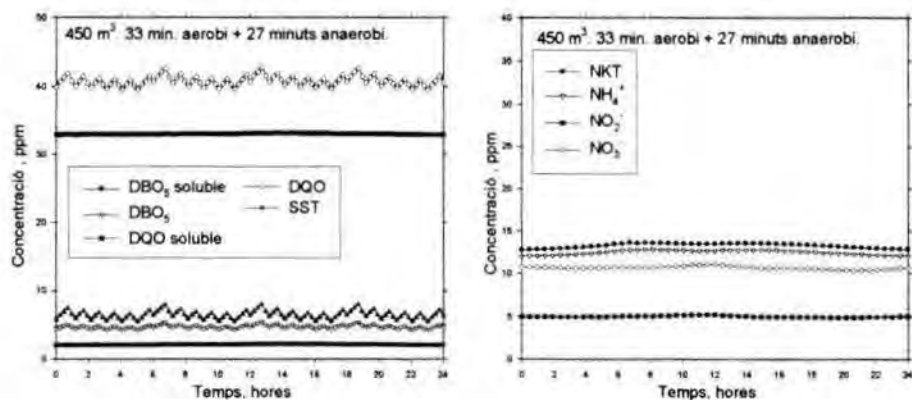


Figura 5.18: Característiques de l'efluent amb 450 m³ de reactor.

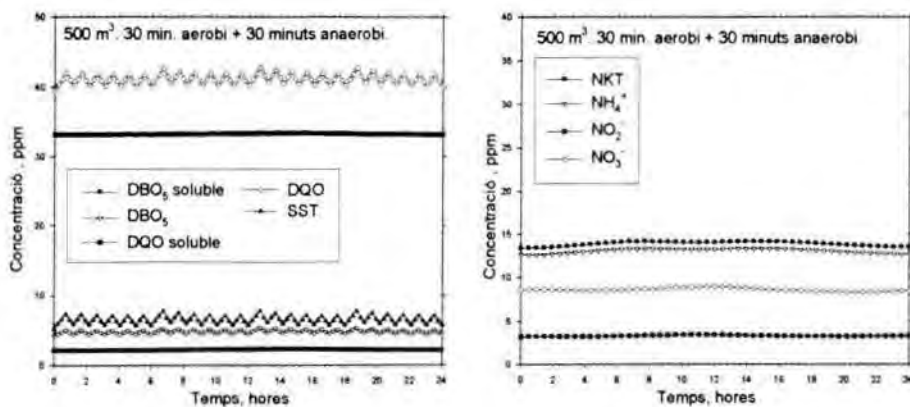


Figura 5.19: Característiques de l'efluent amb 500 m³ de reactor.

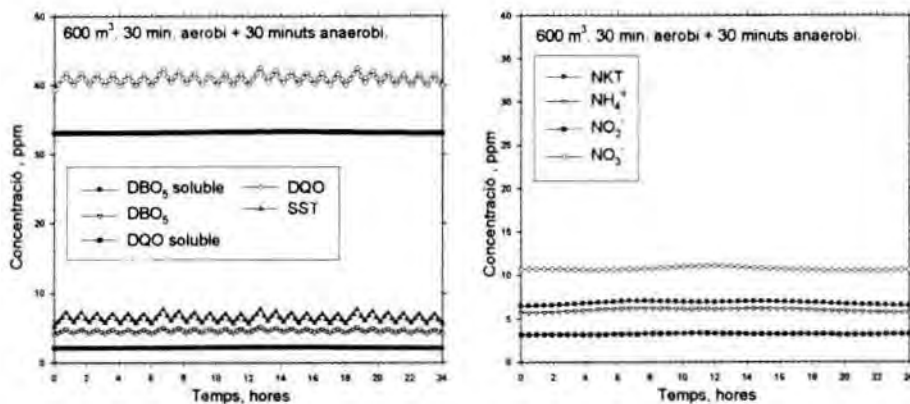


Figura 5.20: Característiques de l'efluent amb 600 m³ de reactor.

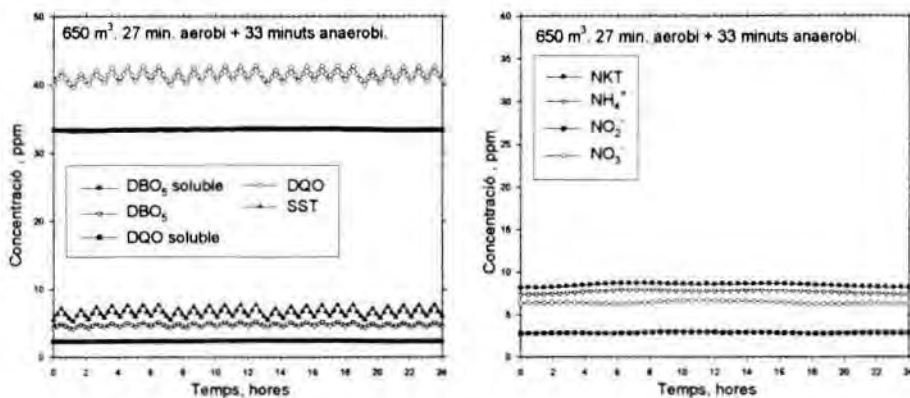


Figura 5.21: Característiques de l'efluent amb 650 m³ de reactor.

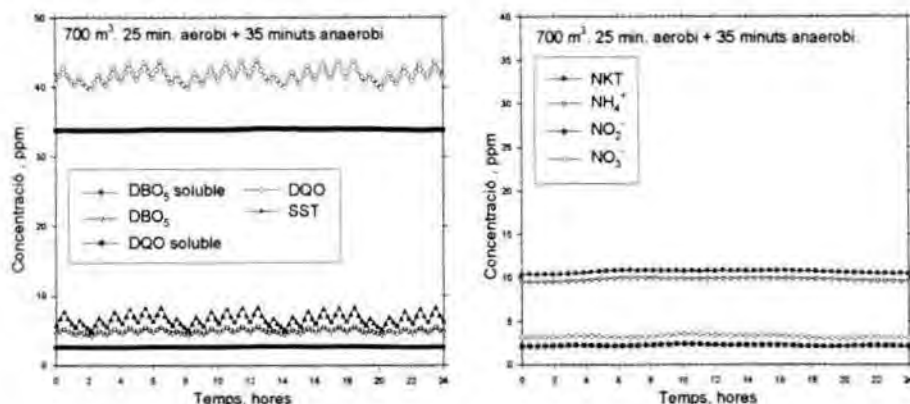


Figura 5.22: Característiques de l'efluent amb 700 m³ de reactor.

Les diverses simulacions efectuades, mostren com amb un volum d'aireig de 250 m³ la capacitat de nitrificar es prou bona tot i que a mesura que a mesurar que augmentem el volum aerobi, i degut en part a la transició del funcionament aerobi a l'anaerobi, les concentracions de NKT i amoni a la sortida augmenten lleugerament fins assolir valor superiors a 10.0 mg N/l tal i com es pot veure en la figura 5.19 amb un volum de 500 m³. En la taula 5.4 es comparen el valors mitjans diaris obtinguts a partir de les simulacions efectuades per a les fraccions del nitrogen (NKT, Amoni, Nitrats i Nitrits).

| V _{reactor} m ³ | % Aerobi | % Anaerobi | [NKT] mg N/l | [NH ₄ ⁺] mg N/l | [NO ₂ ⁻] mg N/l | [NO ₃ ⁻] mg N/l |
|--|-------------|---------------|-----------------|---|---|---|
| 300 | 100.0 | 0.0 | 3.17 | 2.5 | 2.3 | 53.9 |
| 350 | 71.5 | 28.5 | 7.7 | 6.9 | 5.2 | 28.1 |
| 400 | 62.5 | 37.5 | 9.9 | 9.1 | 4.8 | 20.3 |
| 450 | 55.6 | 44.4 | 13.3 | 12.5 | 5.0 | 10.7 |
| 500 | 50.0 | 50.0 | 13.9 | 13.1 | 3.3 | 8.6 |
| 600 | 50.0 | 50.0 | 6.8 | 6.0 | 3.2 | 10.7 |
| 650 | 46.2 | 53.8 | 8.5 | 7.7 | 2.9 | 6.4 |
| 700 | 42.9 | 57.1 | 10.7 | 9.8 | 2.2 | 3.2 |

Taula 5.4: Comparació de la qualitat de la sortida en funció del volum i temps d'aeració.

A partir de les dades de la taula 5.4 es conclouria que per assolir una concentració de NKT inferior a 10 mg N/l i de nitrogen oxidat (nitrats + nitrits) inferior a 5.0 mg N/L necessitariem un volum de reactor de 700 m³ funcionant un 42.9 % del temps en condicions aeròbiques. Aquest funcionament implicaria que per a cada hora de funcionament les turbines haurien de funcionar durant 25 minuts.

6. OURENSE. N/D NO ASSOLIDA EN PLANTES DISSENYADES PER A FER-HO.

La depuradora d'aigües residuals urbanas d'Ourense, fou dissenyada per assolir la nitrificació i desnitrificació de l'aigua residual que tractaria. En la realitat això no s'aconsegueix del tot i es planteja un estudi per veure com a partir de la simulació es poden modificar les condicions d'operació de la EDAR per a N/D.

6.1 DESCRIPCIÓ DE L'EDAR.

La EDAR de Ourense està dissenyada per al tractament de 40.000 m³/dia. La depuradora consta de pretractament (eliminació de greixos i sorres, decantació primària), tractament biològic i estabilització de fangs per digestió anaeròbia (Figura 6.1).

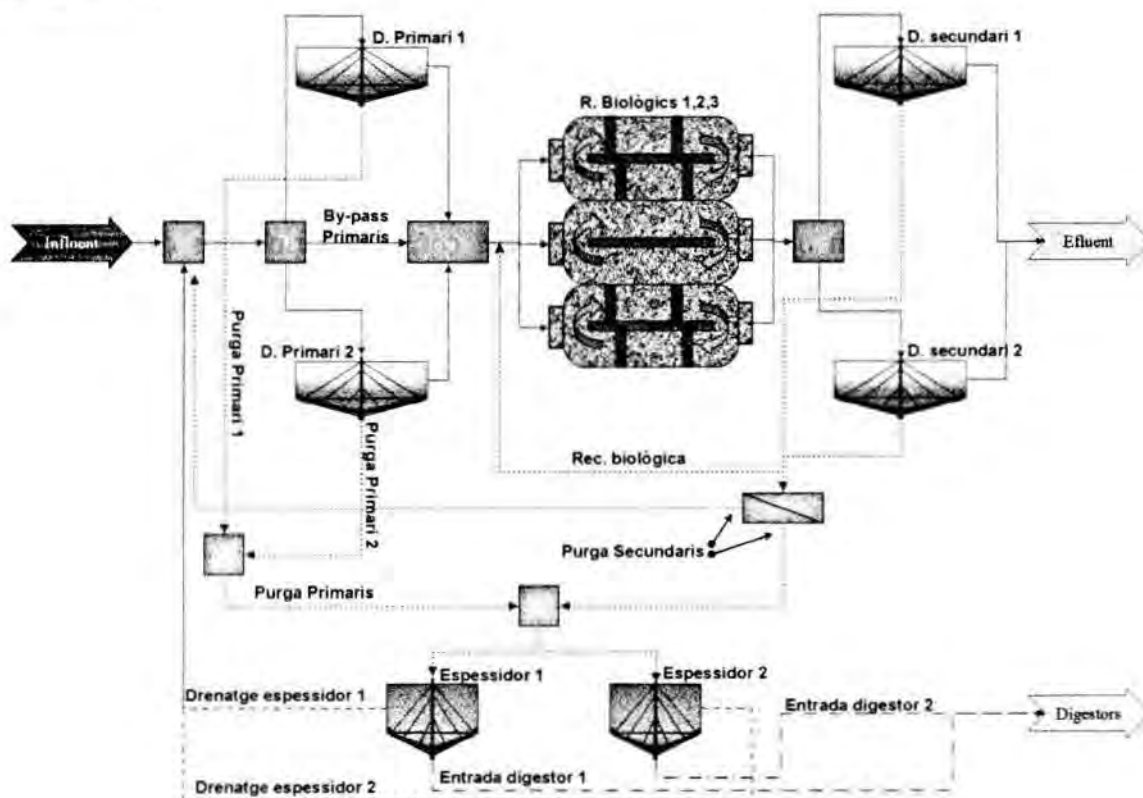


Figura 6.1: Diagrama de la EDAR de Ourense

Pretactament. L'arribada de l'aigua bruta, provinent del sistema de clavegueram de la ciutat, és per gravetat. Per un sistema de pou de bombes, l'aigua rep l'alçada adequada per a poder circular per tota la línia per gravetat. La primera operació unitària és un a bateria de 3 tamisos. Després del tamisat, l'aigua es divideix en dues línies per a l'eliminació de greixos i sorres. Les línies es tornen a unir abans de dividir-les novament en dues per a la decantació primària.

Tractament biològic. L'aigua provinent dels dos primaris s'uneix amb la recirculació biològica en una petita arqueta i posteriorment es reparteix, per mitjà d'un sistema de comportes manuals en els tres reactors biològics (carrusels). De tres unitats biològiques, dues poden treballar amb aireació per rotors i el tercer, situat al mig dels altres dos, no té cap mena d'aport d'oxigen. L'homogeneïtat d'aquest darrer es manté gràcies a la col·locació de una hèlix submergida a cadascun dels canals del carrusel. Les sortides dels biològics s'uneixen per a tornar-se a dividir en dos a l'hora d'accedir als dos decantadors secundaris. El corrent inferior dels secundaris va a parar a una petita arqueta des de on una fracció es recircula i l'altre es purga del sistema.

Línia de fangs. L'origen dels fangs de la EDAR de Ourense pot ser de dos punts diferents. Es poden obtenir fangs a partir del corrent inferior dels decantadors primaris (purga primària), o bé provinent dels decantadors secundaris (fangs biològics en excés). La purga secundària pot anar directament als espessidors o accedir als decantadors primaris barrejada amb l'aigua bruta. Els fangs en excés (primaris i secundaris) s'envien a dos espessidors que serveixen per alimentar el digester anaeròbic de la planta. Després de la digestió anaeròbia, els fangs són filtrats amb un sistema de filtres banda i evacuats de la planta.

6.2 SITUACIÓ ACTUAL.

Dins de les tasques de control i gestió de la planta, la EDAR de Ourense disposa d'un seguiment analític prou important per a una depuradora. Es disposen de gran quantitat de dades tant analítiques com de procés. El sistema de control funcionant en la planta permet efectuar de forma automàtica les diferents tasques d'operació

tals com el canvi de recirculacions, purges o set-points d'oxigen. La majoria d'aquestes operacions queden registrades, disposant d'una base de dades prou extensa de cabals i horaris de funcionament de les diferents unitats i corrents de la planta. Paral·lelament, un seguiment analític tant de les dades d'entrada com de procés es porta a terme. La importància d'aquest seguiment és molt gran si es té en compte per exemple que cada dia laborable s'efectuen caracteritzacions de l'aigua residual d'entrada, situació dels decantadors, ... Tot i que les dades disponibles són prou importants, no deixen de ser valors mitjans diaris, cosa que no ens permetria efectuar simulacions properes al comportament diari de la planta.

6.2.1 Característiques de l'aigua residual.

Per el que fa referència al cabal d'entrada, si prenem els valors horaris durant un mes i calculem el valor mig horari, tindrem el perfil horari aproximat del cabal d'entrada (Figura 6.2). Si observem el perfil horari, podrem veure com el cabal d'entrada a la planta no varia excessivament durant el dia, i per tant podrem considerar que aquest es manté constant al llarg d'aquest.

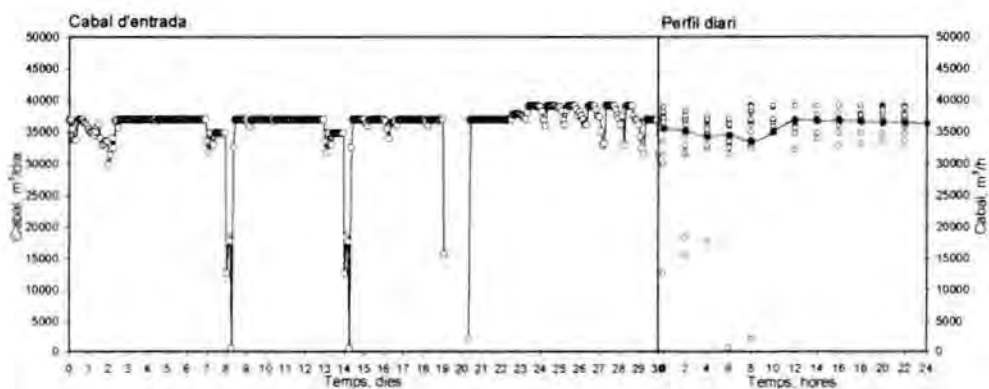


Figura 6.2: Càlcul del perfil horari del cabal d'entrada de la EDAR de Ourense.

Si ens fixem en les característiques pròpies de l'aigua residual, els valors mitjans que normalment entren a la depuradora es poden veure a la Taula 6.1.

| Característiques de l'aigua residual de la EDAR de Ourense ¹ | | | | | | | |
|---|--------|------------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|-------|---------------------|
| SST | DQO | DBO ₅ | NO _x | NH ₄ ⁺ | PO ₄ ³⁻ | NKT | Cabal |
| ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | m ³ /dia |
| 111.13 | 212.48 | 156.49 | 5.15 | 17.079 | 12.72 | 20.88 | 34.000 |

Taula 6.1: Característiques de l'aigua residual abans d'entrar a primaris.

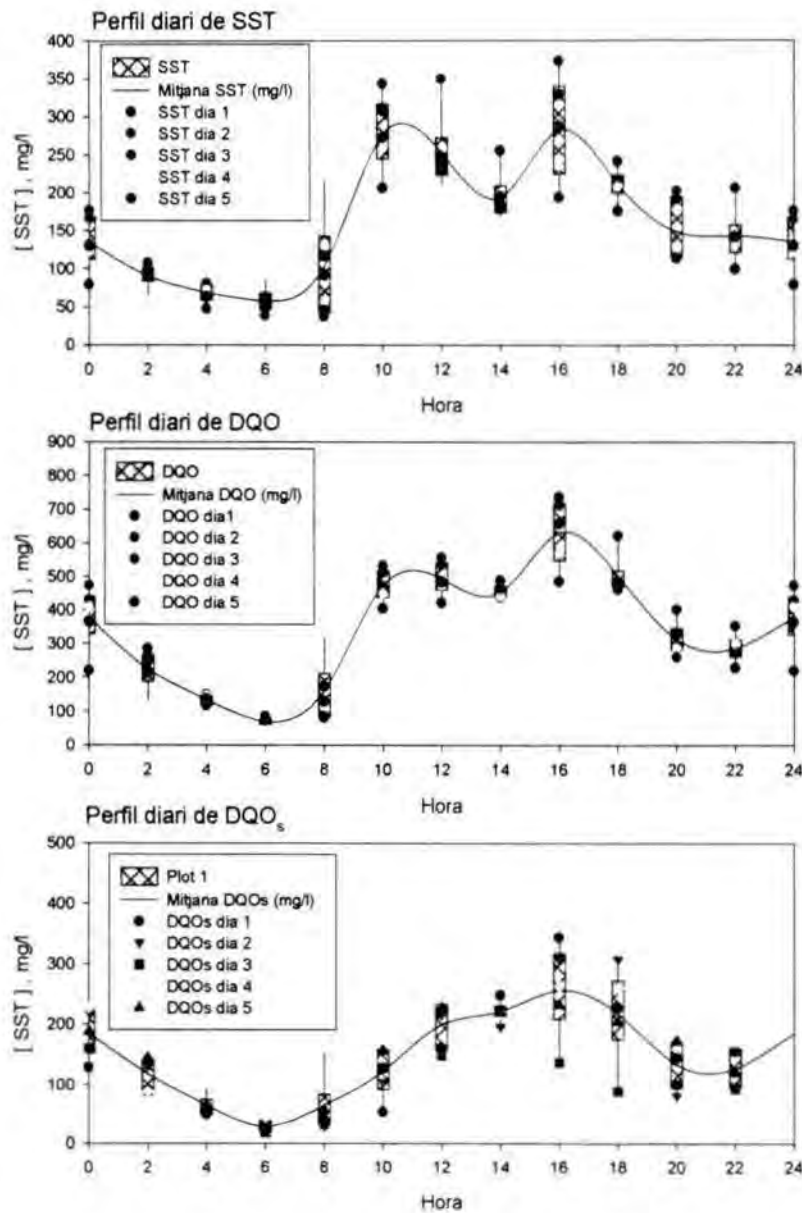


Figura 6.3: Perfils diaris de SST, DQO i DQO₅ a l'entrada de l'EDAR de Ourense.

¹ Valors mitjans diaris dels mesos de Gener i Febrer de 1997

Les dades de la Taula 6.1 no deixen de ser una informació valuosa, però cal tenir en compte la possibilitat d'una variació horària en els valors dels principals paràmetres que identifiquen l'aigua residual. Per determinar la possible variació horària, es realitza una campanya experimental de 5 dies analitzant SST, DQO i DQO_s cada dues hores. Els resultats es mostren a la Figura 6.3 on es pot veure com els tres paràmetres estudiats presenten un perfil diari molt semblant.

6.2.2 Condicions d'operació.

La depuradora de Ourense permet treballar de múltiples formes. Les dues línies de tractament primari poden treballar juntes o de forma independent. En els decantadors primaris, es pot repartir el cabal entre els dos decantadors o accedir directament al tractament biològic sense passar pel sistema de decantació primària (by-pass). El tractament biològic també disposa d'un sistema de repartiment del cabal d'entrada. Després de barrejar-se l'aigua procedent del sistema de decantació primària amb la recirculació, l'accés als tres reactors biològics es pot regular amb un sistema de comportes manuals. A més la purga biològica pot enviar-se directament als espessadors o barrejar-la amb l'entrada dels decantadors primaris i treure-la a partir de la purga de primaris. Aquesta possibilitats donen un marge prou gran per escollir diverses condicions d'operació. En la Taula 6.2 es poden veure les principals condicions d'operació de la EDAR de Ourense durant el període estudiat.

| Condicions d'operació de la EDAR de Ourense | | |
|--|---------------------------|--------------------------|
| Condicció | Valor | Notes |
| Repartició en primaris | 50% | By-pass primaris tancat |
| Repartició aigua biològic | 33% 33% 33% | Parts iguals |
| Recirculació biològica | 28900 m ³ /dia | Valor mitjà del Gener 97 |
| Purga primaris | 1098 m ³ /dia | Valor mitjà del Gener 97 |
| Purga secundaris | 530 m ³ /dia | Valor mitjà del Gener 97 |
| Destí purga secundaris | D. primaris | |
| Fang a digestors | 427 m ³ /dia | Valor mitjà del Gener 97 |

| Condicions d'operació de la EDAR de Ourense | | |
|--|-------------------------|--|
| Condicció | Valor | Notes |
| Drenatges espessidors | 671 m ³ /dia | (Purga Prim. – F. digestors) |
| Consigna O ₂ biològics 1 y 3 | 1.0 mg/l | Biològic n° 2 sense aport d'O ₂ |

Taula 6.2: Condicions d'operació de la EDAR de Ourense.

6.2.3 Dades analítiques.

La qualitat de l'aigua depurada

| Qualitat de l'aigua depurada² | | | | | | |
|---|------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------|
| SST | DQO | DBO₅ | NO_x | NH₄⁺ | PO₄³⁻ | NKT |
| ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm | ppm |
| 9.5 | 36.0 | 18.72 | 6.2 | 18.5 | 9.0 | 14.0 |

Taula 6.3: Qualitat de l'aigua depurada.

A primera vista, i observant les dades de la Taula 6.3, podem veure com la EDAR no assoleix l'eliminació de nutrients per la que es va dissenyar. Les variacions entre l'amoni a l'entrada i a la sortida de la EDAR no difereixen en més de un 1%.

6.2.3.1 Entrada mitjana

Amb la recollida de les dades analítiques, els valors mitjans diaris de les característiques de l'aigua residual que arriba a la planta es poden veure a la Figura 6.4.

² Els valors del NKT són inferiors als d'amoni degut a que els valors que es mostren són el valor mig de les condicions de l'efluent durant el període de 2 mesos.

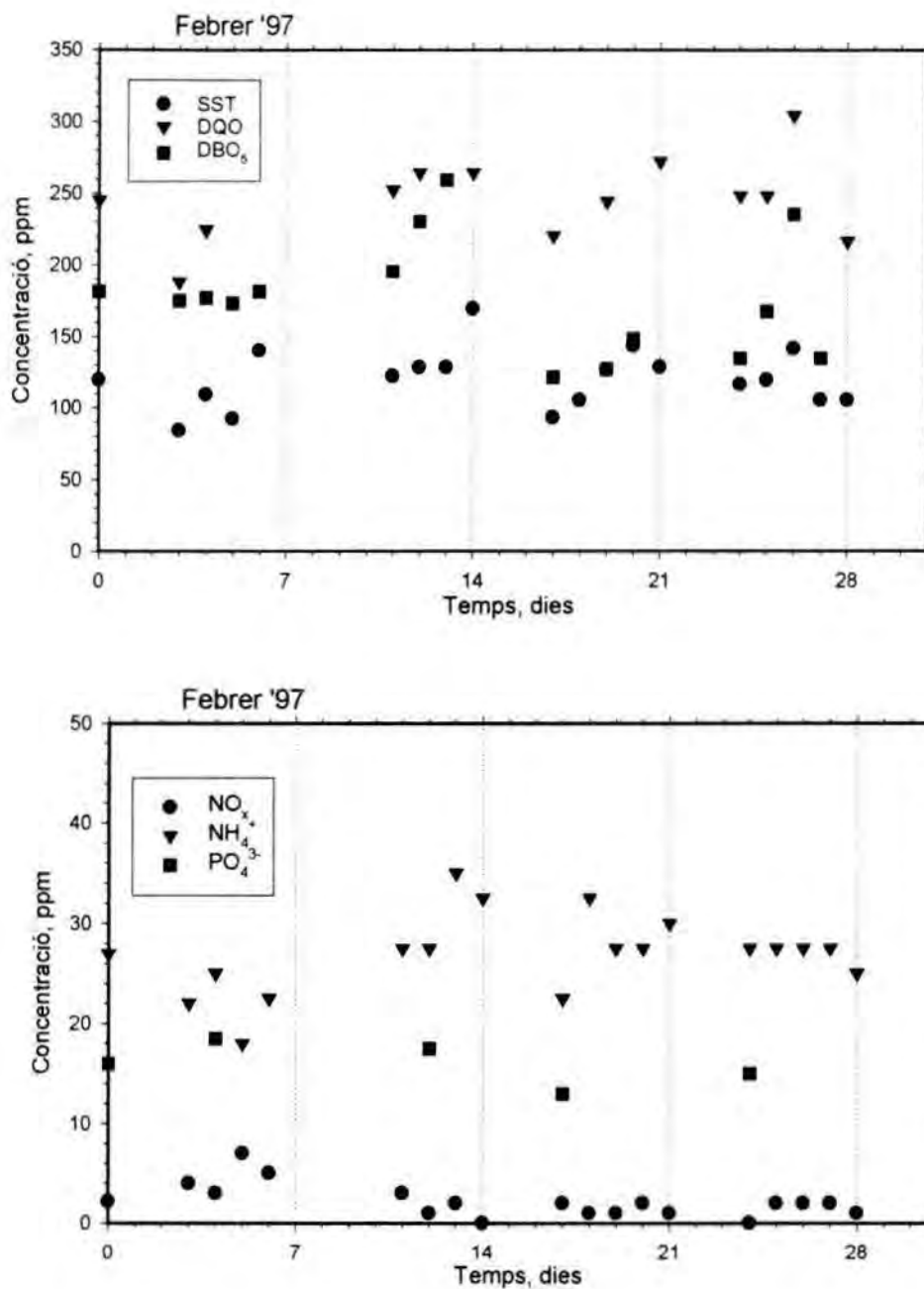


Figura 6.4: Característiques de l'aigua residual a l'entrada del mes de Febrer de 1997.

6.2.3.2 Altres punts del procés

Es disposen també de dades mitjanes diàries de les entrades i sortides del tractament primari, així com analítiques de sòlids totals i volàtils dels reactors biològics (Figura 6.5).

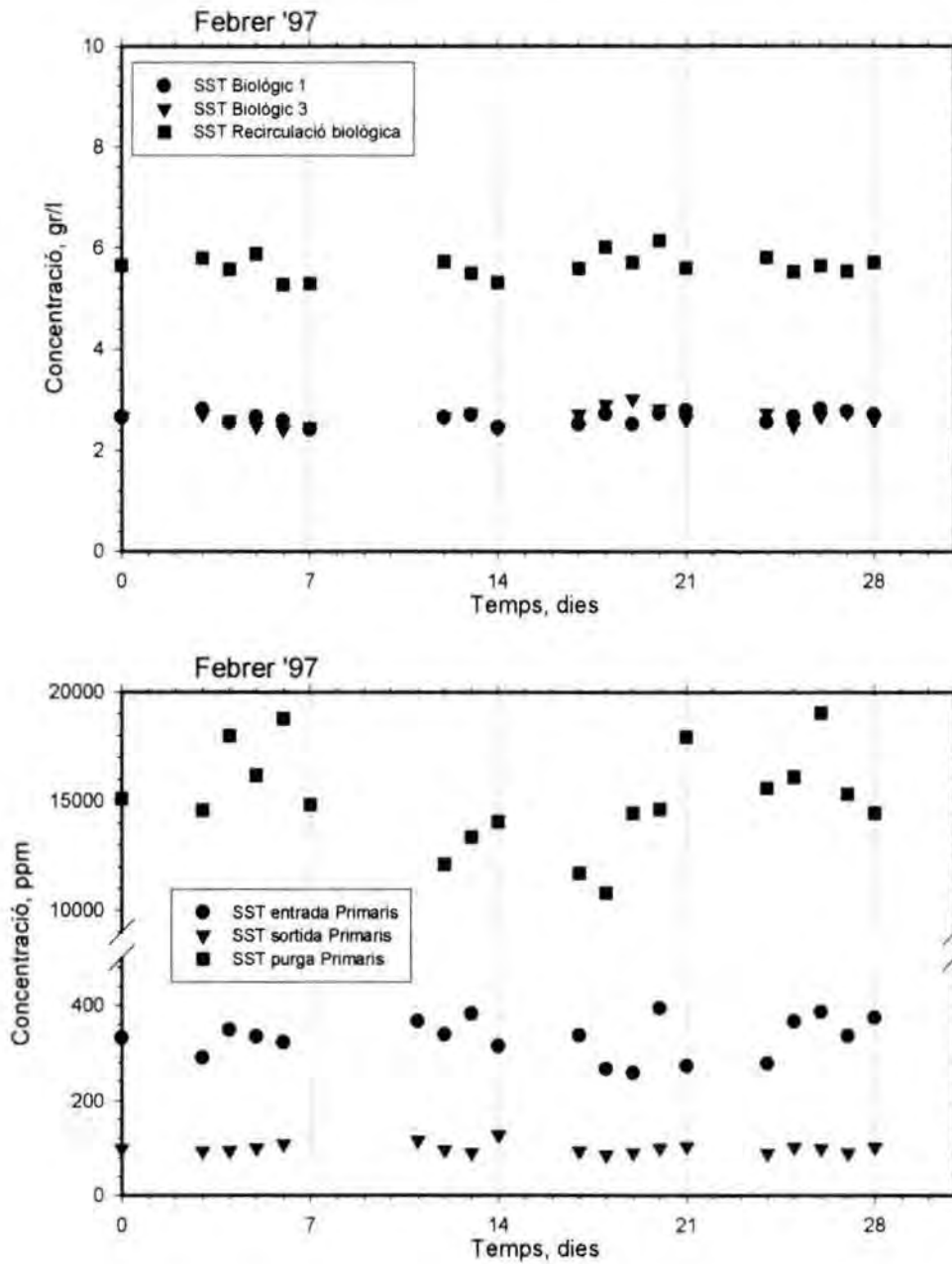


Figura 6.5: SST a diferents punt del procés durant el mes de Febrer de 1997.

Els cabals d'operació i d'entrada els podem veure a la Figura 6.6

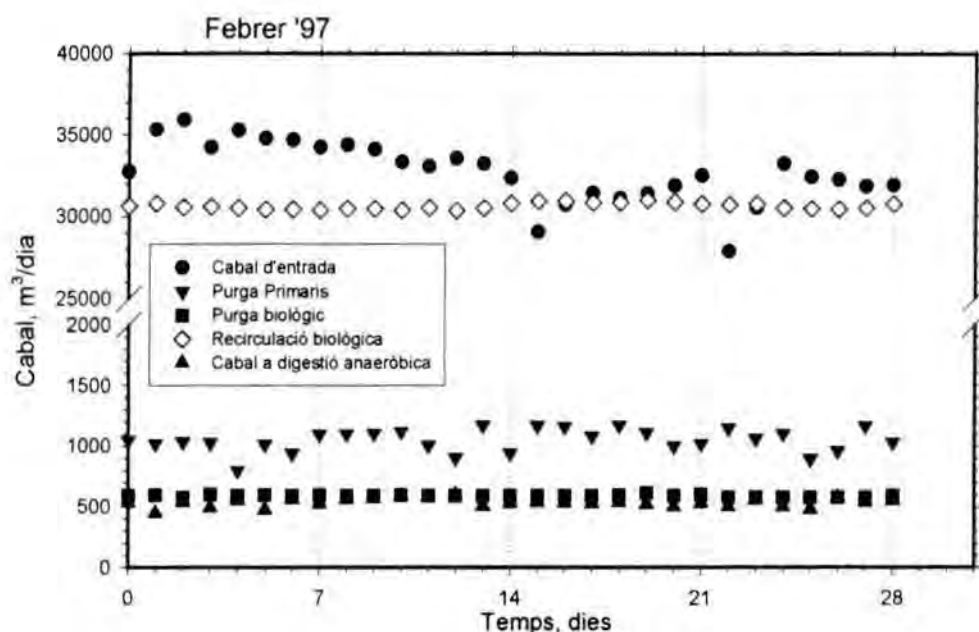


Figura 6.6: Cabals d'entrada i d'operació a la EDAR de Ourense

6.3 OBJECTIU DE LES SIMULACIONS.

Es tracta de trobar quines són les condicions d'operació més adient per solir la nitrificació – desnitrificació de l'influent.

6.4 MODELITZACIÓ DE LA PLANTA.

Per a la modelització de la depuradora de Ourense es parteix del diagrama de la Figura 6.1 on es mostra el diagrama de procés de la depuradora. Ens centrarem en la línia d'aigua que inclou els decantadors primaris, reactors biològics, decantadors secundaris i els espessidors. Els espessidors s'inclouen dins de la modelització degut en part als problemes de retorns que experimenta la depuradora.

6.4.1.1 Decantació primària

El model utilitzar per a la decantació primària és el model unidimensional basat en el flux de matèria en el decantador. Es prenen 10 capes d'igual volum per a la seva representació i es considera la possibilitat de reacció biològica dins dels decantadors primaris.

6.4.1.2 Reactors biològics

La EDAR de Ourense està formada per tres reactors biològics tipus carrusel en paral·lel. Es disposen de rotors per a l'aport d'aire a les basses en dos dels reactors i el tercer, situat al mig dels altres dos, no disposa d'aport d'aire i es manté la circulació de l'aigua i la suspensió dels llots actius mitjançant dues hèlixs submergides situades a cadascun dels ponts del reactor. Els reactors biològics estan comunicants entre si per dos punts, permetent així la circulació de l'aigua des de un a l'altre reactor. Aquesta comunicació és forçada en un punt per la presència d'una hèlix submergida i natural per l'altre. La disposició de les entrades, intercomunicacions i sortides es pot veure a la Figura 6.7.

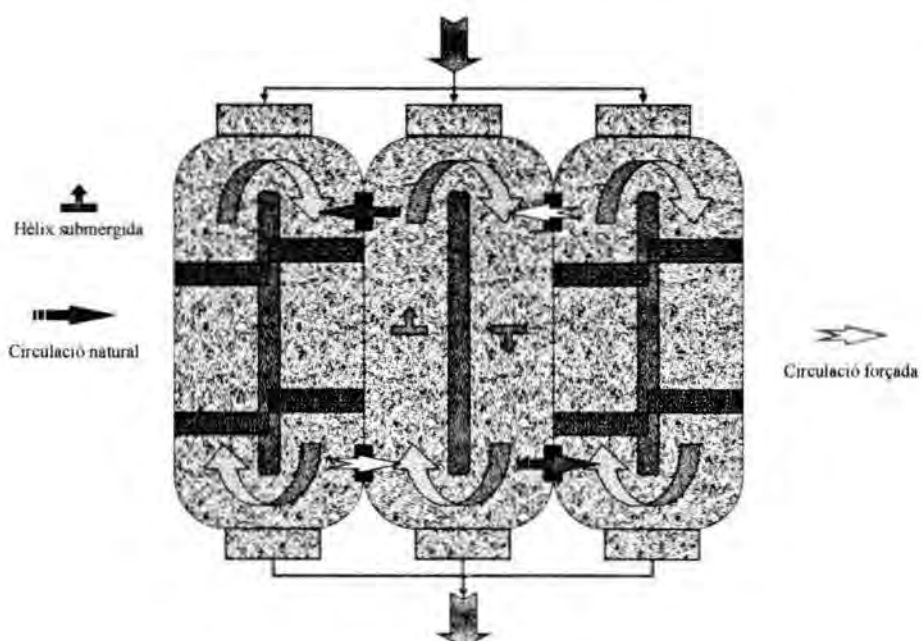


Figura 6.7: Detall de la configuració dels reactors biològics de la EDAR de Ourense.

Per especificacions de catàleg, la circulació forçada és de $120.000 \text{ m}^3/\text{dia}$ ($5.000 \text{ m}^3/\text{h}$). La representació dels tres reactors en el GPS-X serà de 4 RCTA per a cadascun com es mostra en la Figura 6.8. La circulació dels carrusels s'ha estimat, suposant una velocitat superficial de l'aigua de 1 m/s , en $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{dia}$.

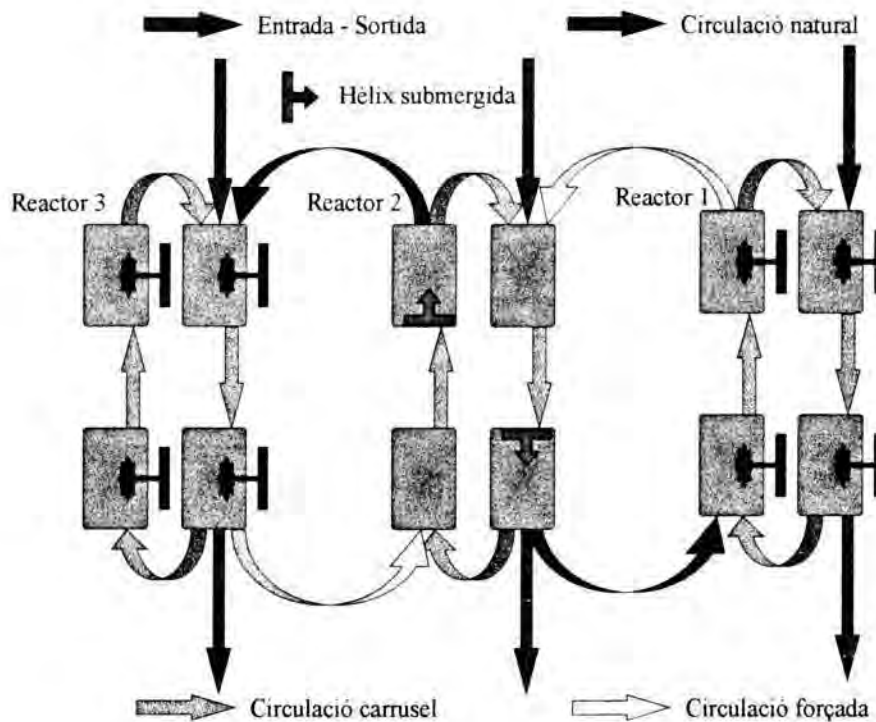


Figura 6.8: Aproximació del GPS-X al sistema de reactors de la EDAR de Ourense.

6.4.1.3 Llibreria utilitzada. Models

Les simulacions de la EDAR de Ourense es realitzaran a partir de la llibreria CN del GPS-X. Els model utilitzat per a la simulació dels reactors biològics és el de Mantis i en els decantadors, tant primaris com secundaris, es considera la presència de reacció biològica, utilitzant un model unidimensional basat en el flux de sòlids entre les 10 capes de cadascun dels decantadors. Les constants cinètiques del model matemàtic es consideren les mateixes en totes les unitats. El diagrama final en el GPS-X és el que es pot veure a la Figura 6.9.

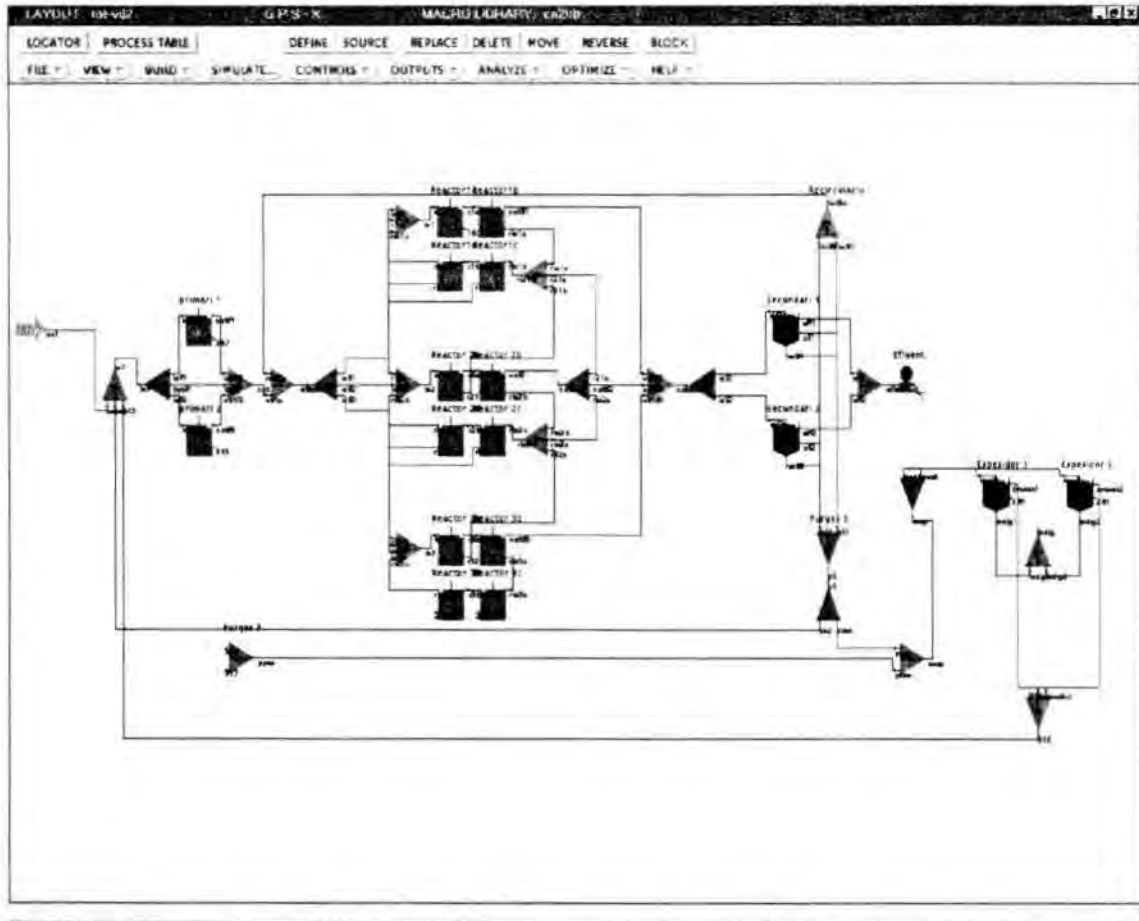


Figura 6.9: Diagrama de la EDAR de Ourense en el GPS-X.

6.5 CALIBRACIÓ DEL MODEL.

Un cop definit el model de la planta es procedeix a la seva calibració. Per aquest cas utilitzarem els valors mitjans diaris experimentals per a la calibració, és per això que haurem de fer servir el mètode de probabilitat que ens brinda el GPS-X i no el de sèries temporals que seria més apropiat per a valors puntuals o integrats en períodes de temps més curts (1-2 hores).

6.5.1 Condicions de la calibració.

Variabls a ajustar:

Reactors biològics: SST, SSV/SST

Decantadors primaris i secundaris: SST

Efluent: DQO, DBO5, NKT, NH4, SST.

Paràmetres:

Estequiomètrics.

Cinètics.

IVF.

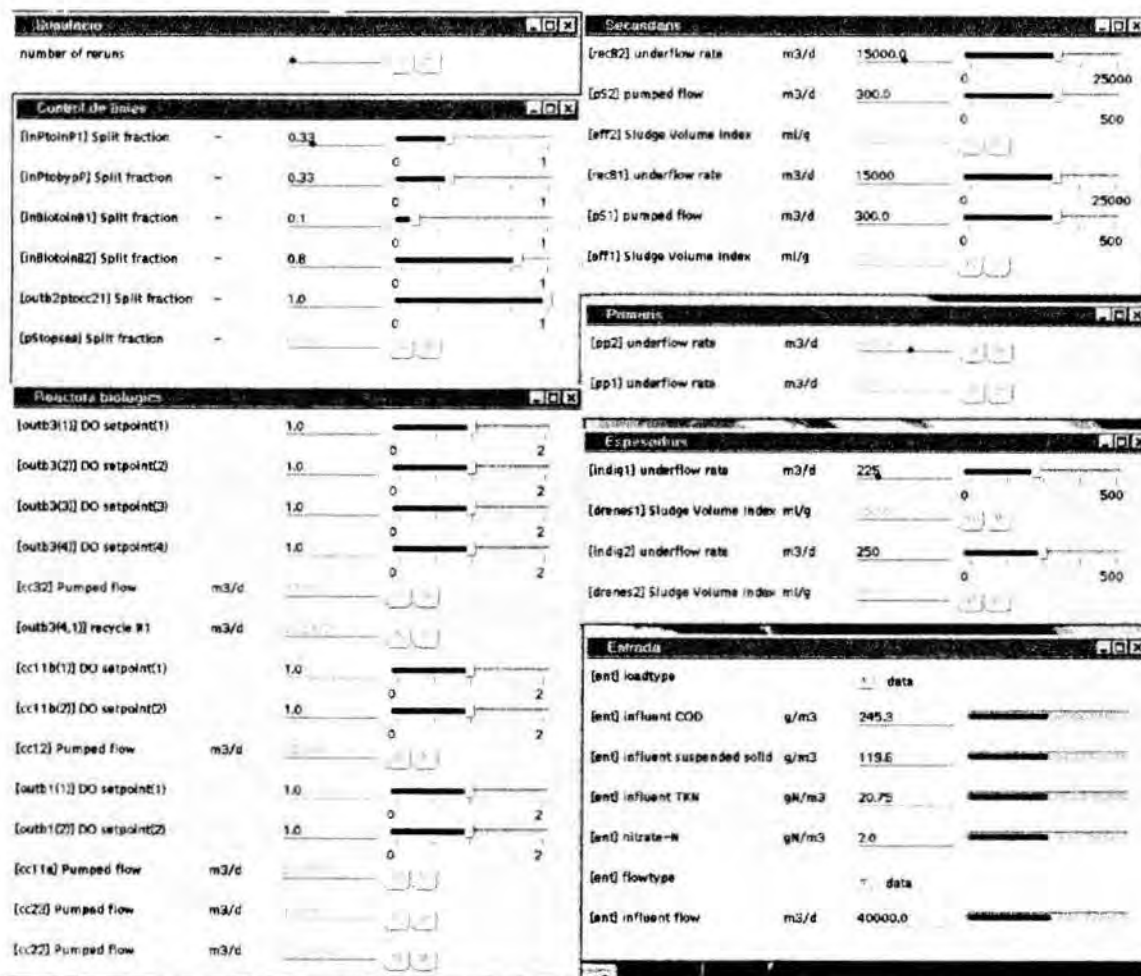


Figura 6.10: Controls utilitzats en el GPS-X per a la simulació de Ourense.

7. ANÀLISI DE LES CAPACITATS DE TRACTAMENT. EDAR DE TARRAGONA.

7.1 DESCRIPCIÓ DE L'EDAR.

La depuradora de Tarragona consta de dues línies de tractament que treballen en paral·lel en cadascuna de les operacions bàsiques de que disposa. El tractament primari consta de desorradors, desgreixadors i dos decantadors primaris. Després del tractament primari, es tornen a unir les línies per accedir al tractament biològic. El tractament biològic està format per dos reactor de fangs actius. Cadascun dels reactors disposa de dues zones diferenciades: una primera (770 m³) sense aeració situada a l'inici del reactor i la segona (3030 m³) amb aeració per difusors amb un volum total de 3700 m³ cadascun. En la figura 7.1 es mostra el diagrama de procés de la depuradora.

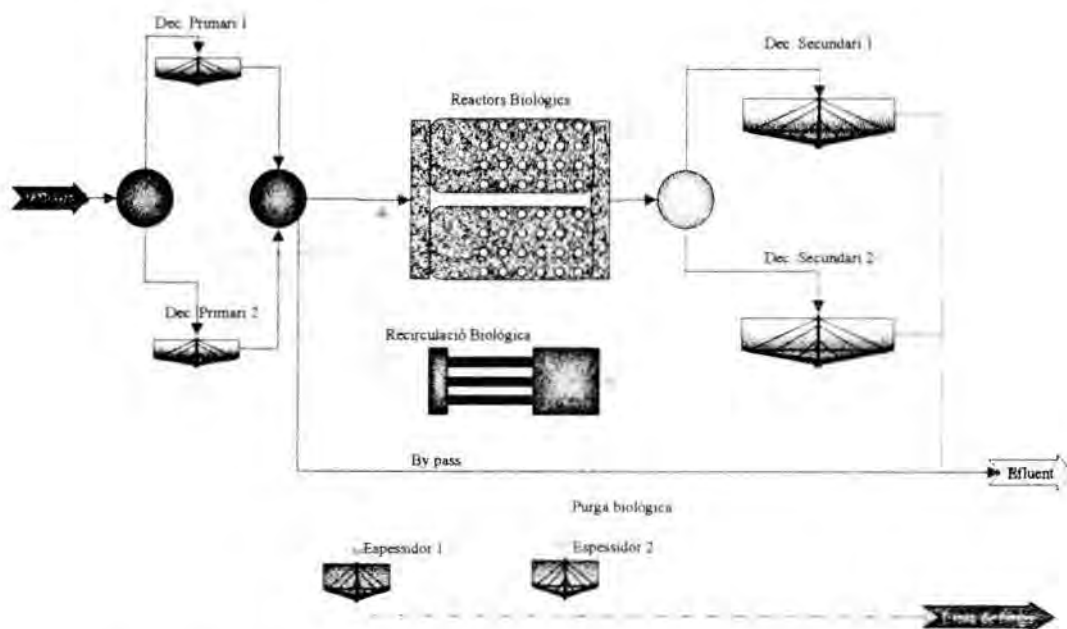


Figura 7.1: Diagrama de la línia d'aigua de la EDAR de Tarragona.

7.2 SITUACIÓ ACTUAL.

7.2.1 Característiques de l'aigua residual.

A partir d'una campanya experimental de 3 dies, es varen caracteritzar diferents punts de la planta: l'aigua bruta (entrada), sortida de primaris i l'efluent. Les variables que es varen caracteritzar segons la freqüència horària que mostra la taula 7.1.

| Localització | Variable analitzada | | | | | | | | |
|------------------|---------------------|------------------|------------------|-----|-----|------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | DQO | DQO _s | DBO ₅ | SST | SSV | NKT | NH ₄ ⁺ | NO ₃ ⁻ | NO ₂ ⁻ |
| Aigua Bruta | 2 | 6 | 12 | 4 | 12 | - | - | - | - |
| Sortida primaris | 2 | 6 | 12 | 4 | 12 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Efluent | 2 | 12 | 24 | 4 | 12 | 6-12 | 6-12 | 6-12 | 6-12 |

Taula 7.1: Freqüència de presa de mostres en hores en funció de la localització.

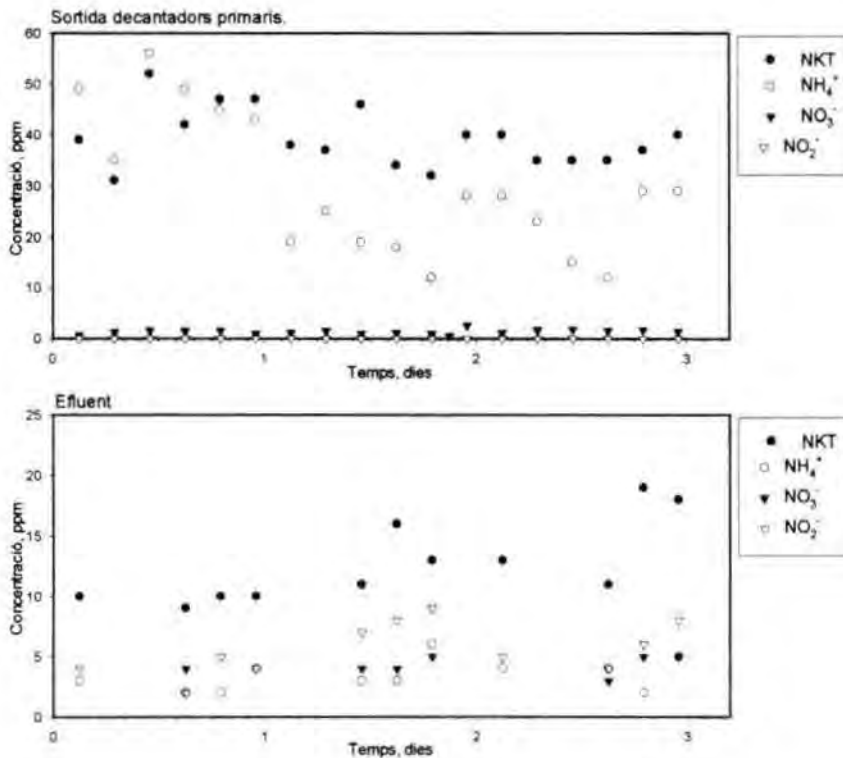


Figura 7.2: Perfil de 3 dies dels compostos nitrogenats.

En les gràfiques de la figura 7.3 és mostren les dades experimentals obtingudes per a la DQO, DBO i sòlids. Els compostos nitrogenats (NKT, amoni, nitrats i nitrits) en la figura 7.2.

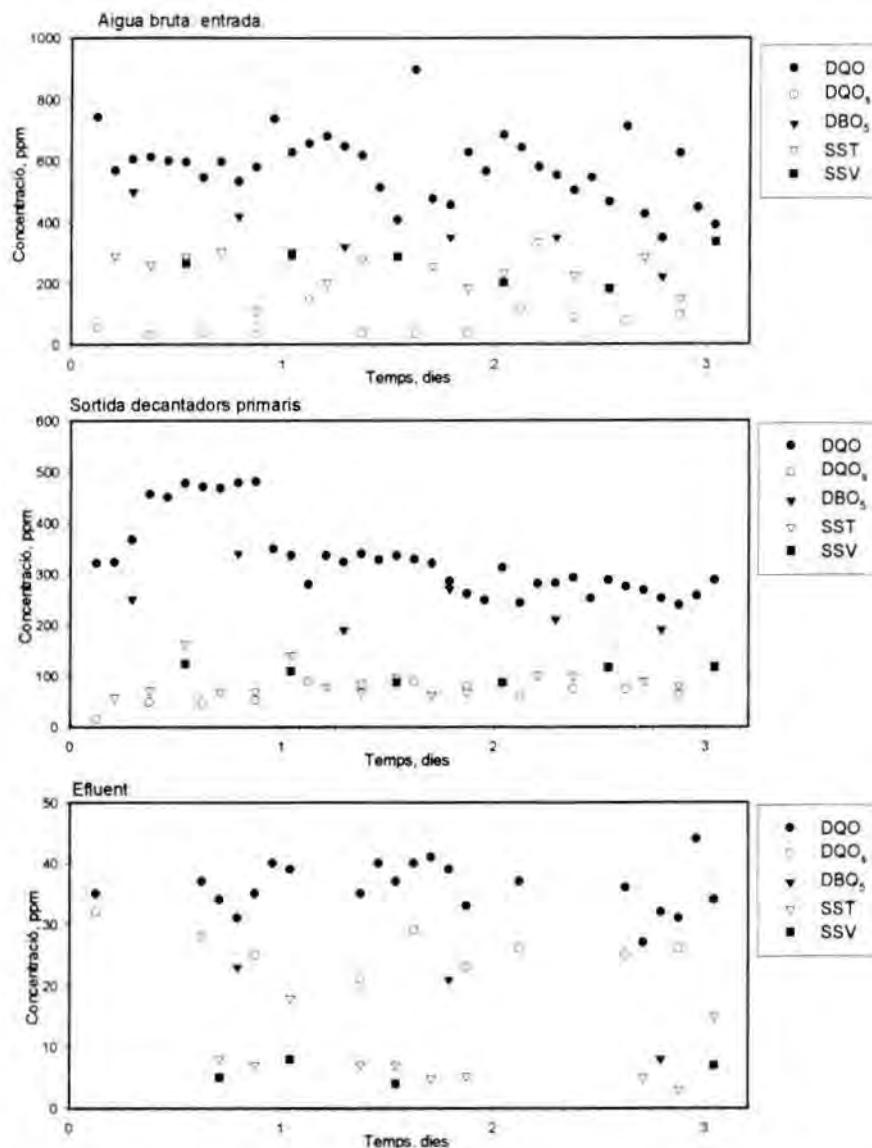


Figura 7.3: Perfil de 3 dies per a la matèria orgànica i biomassa.

7.2.2 Condicions d'operació.

La EDAR de Tarragona disposa d'un sistema d'adquisició de dades en línia que ens permet obtenir amb freqüències de 1 minut els valors reals de la major part de les condicions d'operació. Així es disposen dades de tots els cabals d'aigua i aire de la planta i dels sensors d'oxigen disposats en els dos reactors biològics. Per a

l'elaboració d'aquest estudi es varen recollir les dades disponibles durant tota una setmana, en la que tingué lloc la recollida de dades experimentals.

7.3 OBJECTIU DE LES SIMULACIONS.

La finalitat de l'estudi fou determinar la capacitat de tractament de la EDAR. Concretament s'estudiava la possibilitat d'unir a la línia de tractament les aigües residuals d'un polígon comercial proper.

7.4 MODELITZACIÓ DE LA PLANTA.

La modelització de la planta inclourà els dos decantadors primaris, els reactors biològics i la decantació secundària. La llibreria utilitzada fou la CN2 del GPS-X.

Decantació primària. S'utilitza el model sense reacció biològica amb una dimensió *noreactd*. Com a cabal d'extracció de fangs s'utilitzen les dades obtingudes en línia.

Reactors biològics. S'utilitzen dos reactor de flux pistó dividits en tres compartiments. El primer correspon a la zona anaeròbia i els altres dos a la zona d'aeració. El model utilitzat és el de *Mantis*. La metodologia d'aeració utilitzada és per difusió i es controla la concentració d'oxigen en cadascuna de les dues unitats d'aeració. Com a punt de consigna s'utilitzen les dades obtingudes en línia.

Decantació secundària. Es considera el model amb reacció biològica en una direcció de *mantis1d*. Com a cabal de recirculació s'utilitzen els valors obtinguts en línia. Les velocitats de sedimentació es calculen a partir de l'índex volumètric de fangs (IVF) de 100 ml/gr.

Recirculació i purga biològica. La recirculació biològica de la planta s'efectua amb cargols d'arquimedes. Els corrents d'extracció de fangs dels decantadors primaris s'aboquen en un petit dipòsit des de on s'efectua la recirculació i la purga.

S'ha modelitzat aquest sistema com a un RCTA sense aportació d'aire amb un volum total de 75 m^3 . El model utilitzat ha estat el de Mantis amb els mateixos paràmetres cinètics i estequiomètrics que els reactors biològics.

El diagrama de la planta en el GPS-X es mostra en la figura 7.4.

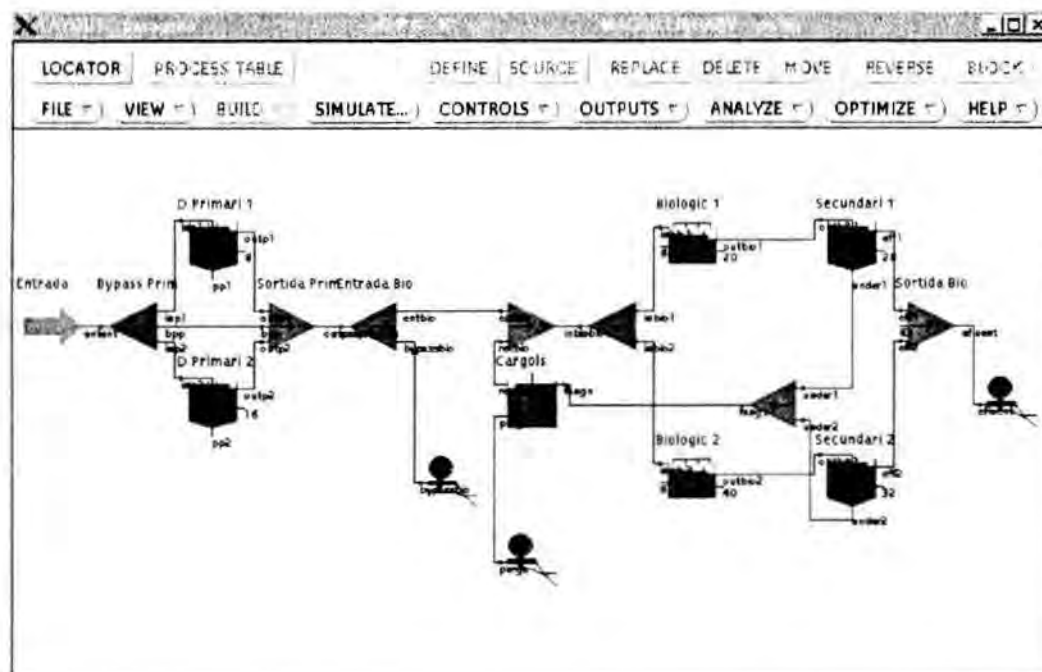


Figura 7.4: Diagrama de procés de Edar de Tarragona amb el GPS-X.

7.5 CALIBRACIÓ

Per a la calibració dels paràmetres cinètics i estequiomètrics dels model s'han utilitzat les dades analítiques de la campanya experimental així com els valors de cabals i concentracions d'oxigen disponibles en línia.

Valors reals obtinguts en línia de la planta utilitzats en la calibració:

- Cabal d'entrada.
- Cabals de purga decantadors primaris.
- Cabal de recirculació biològica.
- Cabal de purga biològica.
- Oxigen dissolt de les basses d'aeració.

7.5.1 Paràmetres cinètics i estequiomètrics.

Amb les dades experimentals s'han ajustat els paràmetres cinètics, minimitzant l'error de les concentracions de DQO, DBO₅, NKT, NH₄⁺, NO₂⁻ i NO₃⁻ a la sortida de la planta. Els valors obtinguts durant el procés de calibració es mostren en la taula 7.2 les fraccions estequiomètriques i en la taula 7.3 els coeficients cinètics.

La comparació entre les valors reals i els experimentals es mostren en les gràfiques de la figura 7.5.

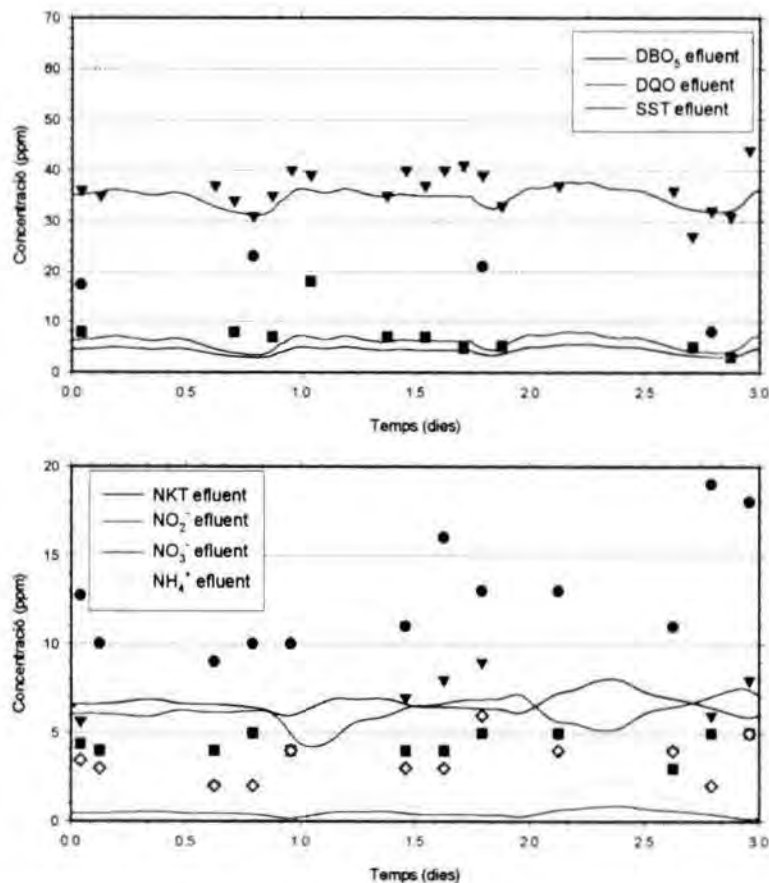


Figura 7.5: Comparació entres els valors experimentals i els obtinguts en la calibració..

| Fraccions | |
|------------------------------------|----------------------|
| DQOp/SSV | 1.48 gr. DQO/gr. SSV |
| BOD ₅ /DBO _u | 0.66 - |

| Biomassa heterotròfica | |
|--------------------------------------|---------------------|
| Rendiment (Y_{het}) | 0.413095 - |
| Contingut de N de la biomassa activa | 0.068 gr. N/gr. COD |
| Fracció endògena | 0.08 - |
| Biomassa autotròfica | |
| Rendiment Nitrosomonas | 0.201776 - |
| Rendiment Nitrobacter | 0.2025 - |

Taula 7.2: Paràmetres estequiomètrics de la EDAR de Tarragona.

| Biomassa heterotròfica | |
|---|---|
| Velocitat específica de creixement màxima | 8.1 1/d |
| Coefficient de saturació | 28.21 gr. DQO/m ³ |
| Creixement aeròbic/anòxic | 0.45 gr. O ₂ /m ³ |
| Constant de mort dels microorganismes | 0.62 1/d |
| Nitrit límit | 1.0 gr. N/m ³ |
| Nitrat límit | 1.0 gr. N/m ³ |
| Límit dels nutrients NO ₂ -NO ₃ | 0.1 gr. N/m ³ |
| Factor de creixement anòxic | 0.8 - |
| Nitrosomonas | |
| Velocitat específica de creixement màxima | 0.53 1/d |
| Coefficient de saturació | 1.18 gr. N/m ³ |
| Creixement aeròbic/anòxic | 0.3 gr. O ₂ /m ³ |
| Constant de mort dels microorganismes | 0.04 1/d |
| Nitrobacter | |
| Velocitat específica de creixement màxima | 0.67 1/d |
| Coefficient de saturació | 0.3 gr. N/m ³ |
| Creixement aeròbic/anòxic | 0.72 gr. O ₂ /m ³ |
| Constant de mort dels microorganismes | 0.040 1/d |
| Hidròlisis | |
| Velocitat específica màxima d'hidròlisis | 2.428 1/d |
| Coefficient de saturació | 0.027 - |
| Factor d'hidròlisi anòxic | 0.34 - |

| | |
|---|--------------------------------|
| Velocitat ràpida d'hidròlisis | 18.0 1/d |
| Coefficient de saturació de hidròlisis ràpida | 0.04 - |
| Velocitat d'amonificació | 0.0446 m ³ /gr. COD |
| Funcions de bescanvi | |
| Concentració límit d'amoni | 0.05 gr. N/m ³ |

Taula 7.3: Paràmetres cinètics de la EDAR de Tarragona.

7.6 SIMULACIONS EFECTUADES

Totes les simulacions parteixen d'un corrent d'entrada considerat Normal que té les següents característiques:

Cabal: es pren un perfil de 6 dies que es repeteix fins a un total de 24 dies. (aprox. 24500 m³/dia de valor mig)

Composició: a partir dels valors mitjos dels calculats experimentalment. Es consideren constants. DQO: 577 ppm, SST: 250 ppm, NKT: 50 ppm.

S'efectuen les següents simulacions:

- 1.- Anàlisi de sensibilitat del cabal d'entrada.
- 2.- 24500 m³/dia normal + 1000 m³/dia d'aigua de Polígons.
- 3.- 26000 m³/dia normal + 2500 m³/dia d'aigua de Polígons.
- 4.- 32000 m³/dia normal + 2000 m³/dia d'aigua de Polígons.

El cabal d'aigua residual de polígons es considera de les següents característiques:

- DQO: 1100 ppm
- SST: 350 ppm
- NKT: 75 ppm

7.6.1 Anàlisi de sensibilitat del cabal d'entrada.

Si augment el cabal d'entrada des de 24500 m³/dia fins a un màxim de 43000 m³/dia, les condicions de l'efluent que obtindrem seran les següents:

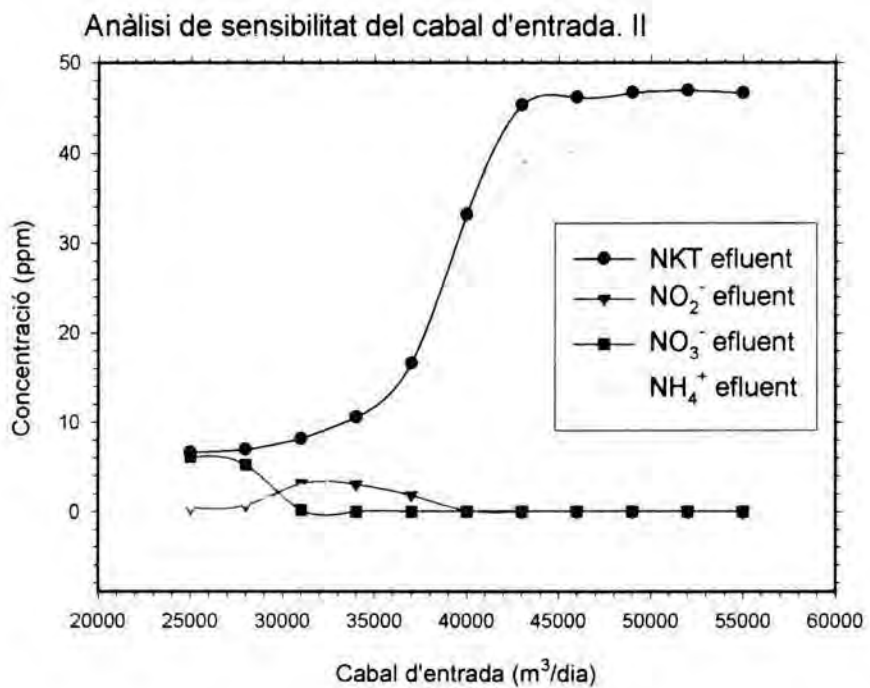
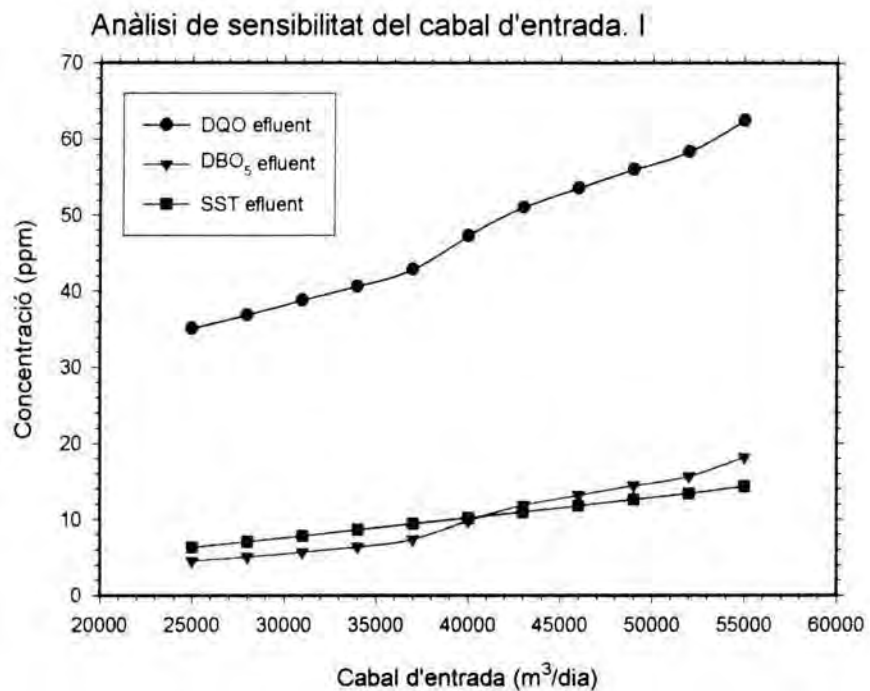


Figura 7.6: Anàlisi de sensibilitat del cabal d'entrada.

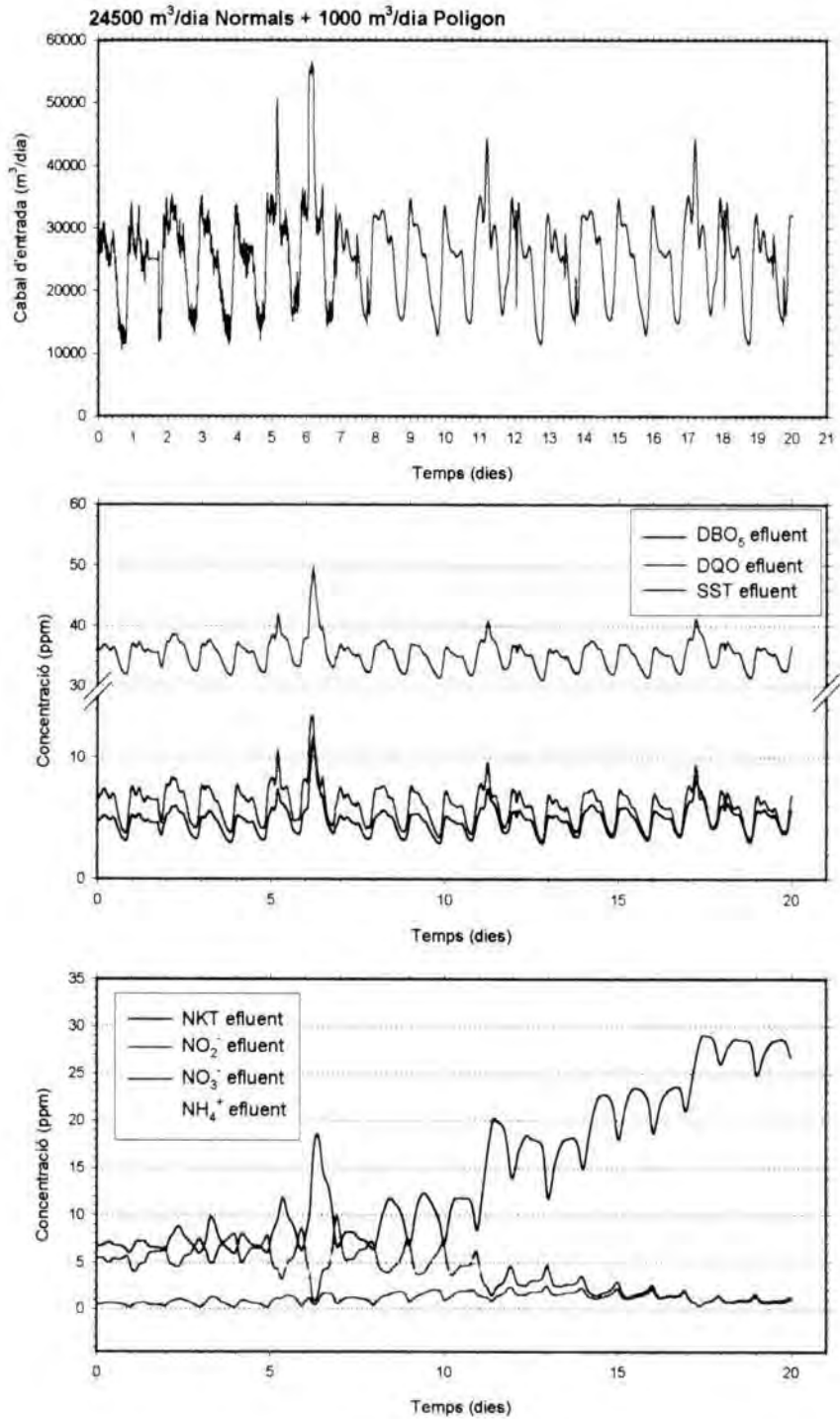
7.6.2 24500 m³/dia de cabal normal + 1000 m³/dia d'aigua de polígons.

Figura 7.7: Resultat de l'efluent amb 1000 m³/dia d'aigua de polígons i 24500 m³/dia de cabal normal.

7.6.3 26000 m³/dia de cabal normal + 2500 m³/dia d'aigua de polígons.

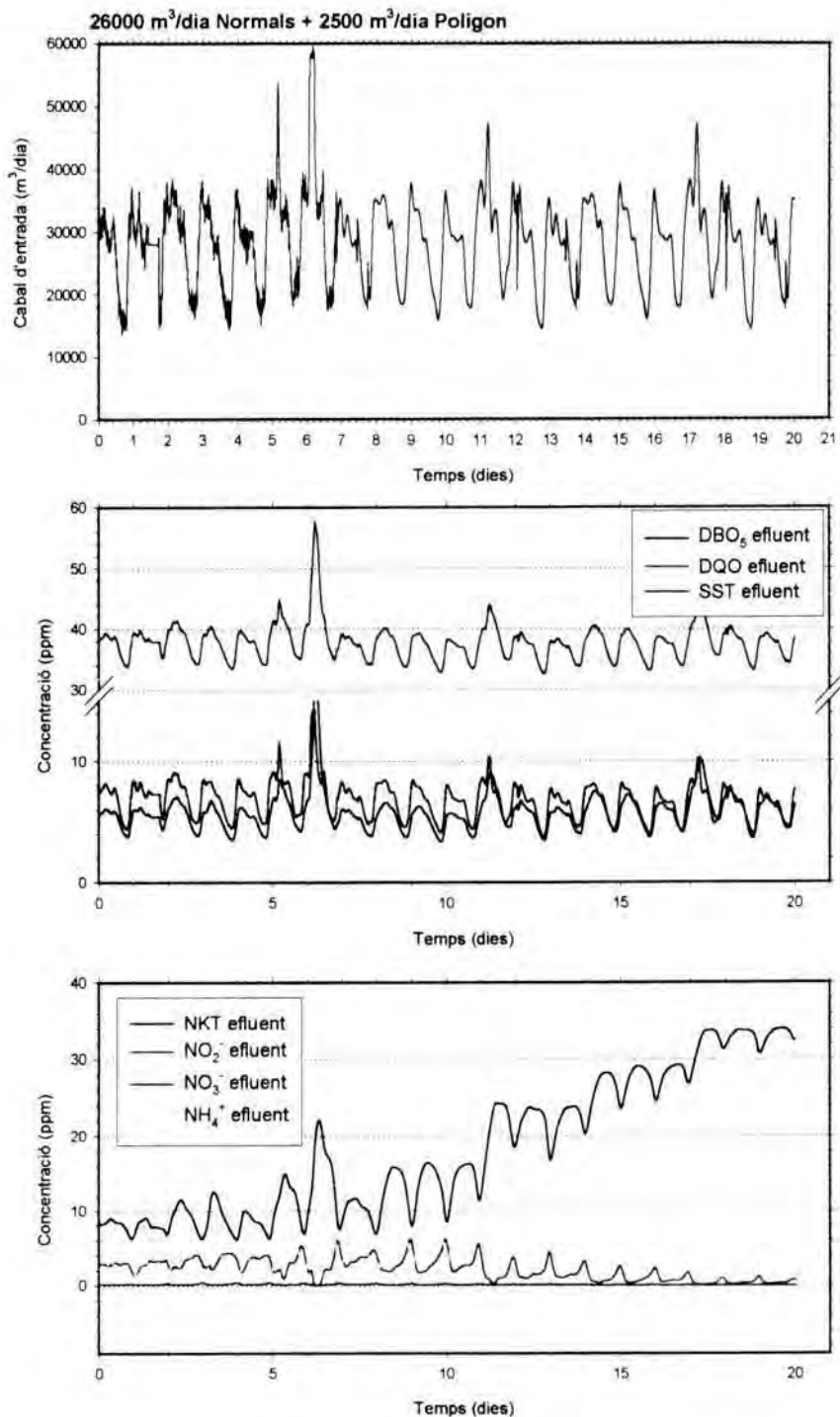


Figura 7.8: Resultat de l'efluent amb 2500 m³/dia d'aigua de polígons i 26000 m³/dia de cabal normal.

7.6.4 32000 m³/dia de cabal normal + 2000 m³/dia d'aigua de polígons.

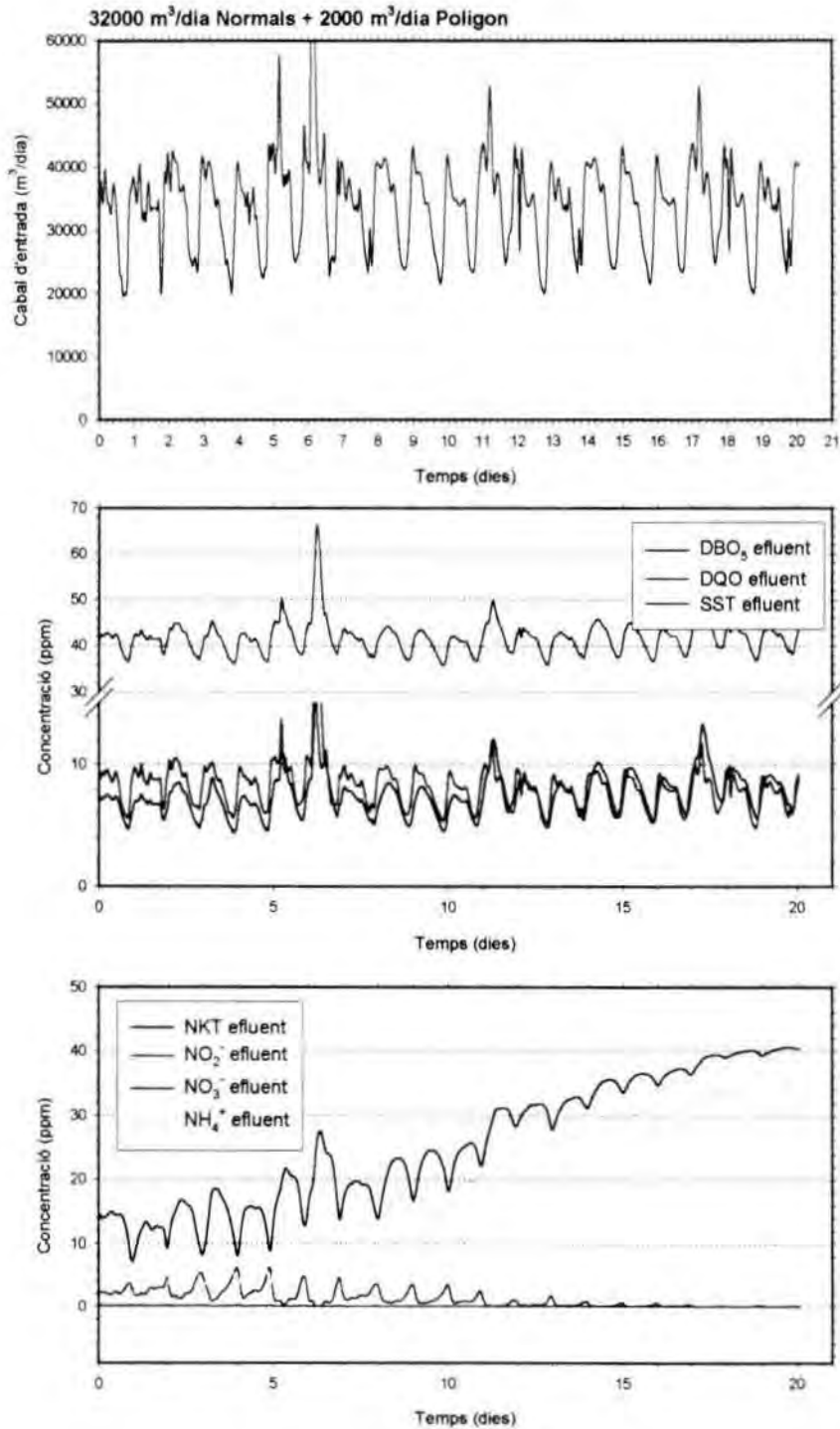


Figura 7.9: Resultat de l'efluent amb 2000 m³/dia d'aigua de polígons i 32000 m³/dia de cabal normal.

WAVELETS

8. WAVELETS. UNA TÈCNICA DE FILTRAT DE SENYALS.

1.1 INTRODUCCIÓ. ORÍGENS I DEFINICIONS

En l'actualitat la capacitat de càlcul dels ordinadors s'ha disparat de forma exponencial. Aquestes altes prestacions han permès l'elaboració nous algorismes de càlcul impensables fa tan sols uns pocs anys. Aquesta evolució de la tècnica ha vingut imposada en part per la constant de necessitat d'efectuar gran quantitat d'operacions en un termini de temps molt petit. En el camp del tractament de senyals, l'aparició de les anomenades wavelets n'ha revolucionat el seu entorn. L'aplicació de la informàtica en els processos industrials ha avançat de forma paral·lela a la indústria informàtica. En l'actualitat ja existeixen gran quantitats de sensors que ens permeten mesurar d'una forma més o menys continuada la major part del paràmetres físics i químics d'una aigua residual (cabals, oxigen, conductivitat, elèctrodes selectius, ...). Aquesta gran quantitat de dades de que es poden disposar sovint son utilitzades de forma general sense aportar una gran informació a l'usuari final. De fet, un dels problemes que experimenten aquestes senyals obtingudes en línia és la presència de errors incorporats al sistema. Aquests errors varien des de sorolls de fons fins a possibles descalibrats de la sonda en qüestió.

Per a l'eliminació dels possibles errors de les senyals obtingudes en línia es disposen d'algorismes matemàtics que ens permeten dividir el senyal en dues: el senyal neta i el soroll de fons. La tècnica més utilitzada per aquesta finalitat ha estat la transformada de Fourier. La transformada de Fourier es basa en definir la nostra senyal com a la suma de un numero finit de funcions sinusoidals. L'aplicació de la transformada de Fourier requereix canviar l'espai on es treballa, des de l'espai del temps a l'espai de freqüència. Una de les limitacions de la transformada de Fourier és que si s'efectua un filtrat a nivells elevats (eliminats gran quantitat de freqüències) es perd del tot el significat de el senyal.

L'aplicació de wavelets o funció d'ona donen molta més informació que no pas la transformada de Fourier. Introdueixen el concepte d'escala d'una senyal.

Bàsicament ens diuen que es pot realitzar un filtrat del senyal original a diferents escales, es a dir, en funció de la resolució que desitgem podrem efectuar un filtrat més o menys agressiu. Una altra opció de les wavelets es que no estem limitats a representar la nostra senyal original amb una funció trigonomètrica. L'ús de les escales ens pot arribar a ser molt útil si tenim en compte que moltes vegades es necessita saber la tendència global del senyal.

1.1.1 La noció d'escala.

El concepte d'escala és una de les nocions més importants en l'anàlisi de les tendències d'un procés. La importància d'aquest concepte radica en el fet de que per a descriure la tendència d'un procés qualsevol, es necessari interpretar les dades que obtenim d'aquest (les dades observables) a un nivell de resolució o escala que coincideixi amb l'escala del fenomen que té lloc en el nostre sistema.

Per exemple, si volem observar com varia la concentració a la sortida de un RCTA que inicialment té una concentració de sal de 10 mg/l amb un temps de residència hidràulic θ , ens caldrà conèixer valors de la concentració de sal a intervals de temps suficientment petits com per a observar-ne la tendència real del procés. De poc ens serviria en el cas anterior prendre mostra a intervals de l'ordre de 3 ó 4 vegades θ ja que la tendència que obtindriem no s'ajustaria prou al comportament real del sistema.

Noció d'escala. L'escala d'un procés és un paràmetre quantificable que caracteritza la resolució del senyal que ens origina un procés fisico-químic qualsevol. La relació entre escala i resolució és inversament proporcional de forma que a major escala menys resolució i viceversa.

El concepte de resolució que apareix en la noció d'escala, i a efectes pràctics, dependrà bàsicament de la freqüència de mostreig del sensor que mostra com evoluciona un dels paràmetres del sistema. Com més petit sigui l'interval de temps de temps en que pugem obtenir el valor d'una de les propietats del sistema, més gran serà la resolució que n'obtindrem. És molt important tenir present que el procés té lloc a una certa escala temporal i que la resolució del senyal que obtenim

pot venir més o menys fixada per a nosaltres en funció dels sensors de que disposem per a observar-ne el comportament.

Un cop obtingut el senyal d'un procés determinat, es pot disminuir la resolució a que ha estat obtinguda, però mai podrem obtenir-ne una altra amb més resolució que la inicial. Quant reduïm la resolució d'una senyal el que estem fent és suavitzar la tendència que aquesta ens mostra. De fet, l'ull humà pot visualitzar la tendència d'una senyal a diferents resolucions sense necessitat d'efectuar un gran esforç. Mentalment podem tenir en compte petits fenòmens locals que tenen lloc en el senyal o deixar-los de costat i observar de forma simplificada la tendència global del senyal.

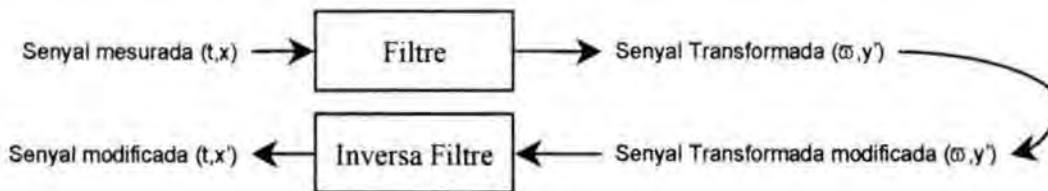
Resolució d'una senyal. Com més gran és la resolució d'una senyal, els canvis puntuals que experimenta localment es poden veure d'una forma més acurada i viceversa.

Un cop introduït el concepte d'escala i resolució, cal prendre una sèrie de conceptes que ens ajudaran a entendre d'una forma més acurada el concepte d'escala.

- La tendència d'un procés és possiblement el resultat de diferents fenòmens físico-químics que intervenen en el sistema. Cadascun d'ells actuant a la seva pròpia escala.
- La tendència d'un procés es pot descriure a diferents escales d'interès i cap d'elles és més important que una altra.
- A part de les dimensions d'espai del sistema, el paràmetre de l'escala és una dimensió necessària per a la descripció de la tendència d'un procés.

8.1 FILTRAT DE SENYALS.

Les dades mesurades d'un procés poden arribar a contenir una gran quantitat d'informació sobre l'estat, evolució o tendència del procés. Un mètode d'anàlisi de dades ideal hauria de ser capaç d'extreure, a partir del senyal original, informació de tot tipus de forma que pogués ser interpretada amb el màxim de profit per a l'usuari o procés que el segueixi. Els mètodes d'anàlisi actuals, extreuen les diferents tendències o característiques del senyal original dins de l'espai d'escales. Aquest procés d'extracció d'escales es sol realitzar a través del que es coneix com a filtrat de senyals.



Els anàlisis multiescalar modifiquen els diferents paràmetres del filtre de forma que es poden extreure diferents escales a partir d'una mateixa senyal. Ara bé, el fet d'efectuar el filtrat d'una senyal original no vol dir que puguem aïllar d'una forma clara i definida les característiques particulars del senyal original, bàsicament això es degut a dues raons:

- Els processos fisico-químics que intervenen en la formació del senyal original del procés tenen lloc dins d'una gran varietat d'escales i cap d'elles és d'entrada més important que una altra. L'escala utilitzada pot ser seleccionada a partir de l'especulació de models de senyals i sorolls. De vegades però, no es pot diferenciar prou bé què forma part del senyal i què és soroll de fons del

procés i calen processos més complexos que impliquen una adaptació de l'esquema de filtrat per a cada cas en concret.

- La major part dels filtres tenen la particularitat d'efectuar un increment de l'escala del senyal original d'una forma global. Aquest increment d'escala de forma global implica l'aparició de distorsions de característiques puntuals del senyal degudes a la suavització que s'efectua en el senyal. Com a exemple l'aparició d'una fallada mecànica pot comportar un canvi brusc del senyal, que un cop filtrada i suavitzada es pot arribar a confondre amb un canvi en les condicions dels procés.

Tot i així, la utilització d'una anàlisi multiescalar ens pot arribar a ser molt útil en la definició de les situacions d'un procés. Cal però definir una sèrie de propietats desitjables en la descomposició d'una senyal en les seves múltiples escales:

- Els filtres han de cobrir la totalitat de l'espai del temps i de les freqüències, ja que característiques importants del sistema poden succeir en qualsevol punt de l'espai d'escales.
- La informació rellevant ha de més explícita en una representació multiescalar que no les dades originals. Lògic, doncs si en la representació multiescalar les característiques del senyal resten més amagades, millor seria utilitzar les dades originals.
- Les descripcions en les successives escales haurien de ser el menys redundants possibles, i de forma ideal cadascuna d'elles hauria de ser independent de les altres.
- La representació hauria de permetre la compressió de les dades per eliminació d'informació irrellevant per obtenir-ne una eficient representació. En molts de casos el rang de freqüències del soroll de fons o altres característiques es pot arribar a conèixer. La descomposició del senyal ha de poder permetre l'eliminació d'aquestes característiques.

- Reconstrucció estable i completa de les dades originals a partir de la representació multiescalar. La completa reconstrucció de les dades originals ens assegura que cap tipus d'informació es perd de forma inadvertida durant el procés d'extracció.
- L'extracció de característiques qualitatives i quantitatives del senyal original hauria de ser possible a fi i efecte de reconèixer patrons de comportament temporal o permanent.

L'anàlisi multiescalar de senyals fou introduït per Witkin (1983) amb una anàlisi multiescalar utilitzant filtres gaussians, altres tecnologies utilitzades han estat tècniques molt usades de forma clàssica com la transformada de Fourier.

8.1.1 Filtre d'escala-espai.

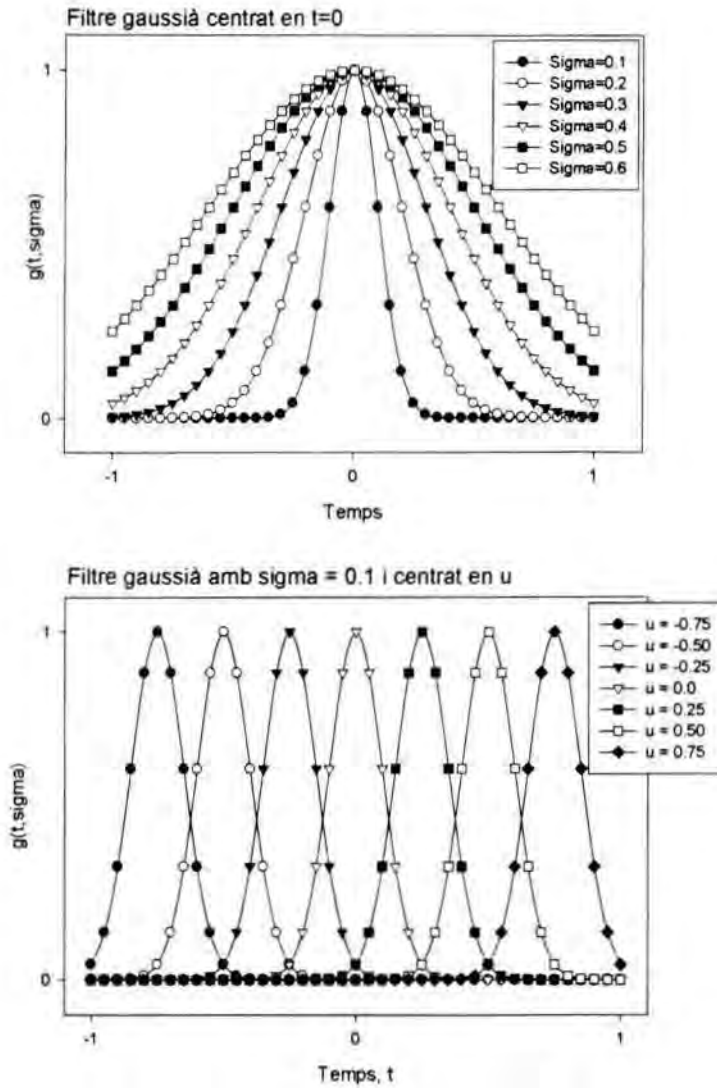
Els filtres escala - espai foren introduïts per Witkin (1983) a partir de la representació temps - freqüència de senyals amb un filtre de Gauss. L'origen del filtre es basa en convolucionar una senyal amb un filtre gaussià. Aquesta convolució implicava la desaparició de certes freqüència a mesura que es varia la desviació estàndard del filtre gaussià. El senyal filtrat vindrà donat per l'equació:

$$F(t, \sigma) = f(t) * g(t, \sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(u) \times \left\{ \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(t-u)^2}{2\sigma^2}\right) \right\} du \quad \text{Eq. 8.1}$$

on : $F(t, \sigma)$, senyal filtrada amb una desviació estàndard de σ .

$f(t)$, senyal original

$g(t, \sigma)$, filtre gaussià centrat en u i amb una desviació estàndard σ .



L'equació 8.1 ens dona la localització en l'espai del temps del gaussià, la localització en l'espai de freqüències vindrà donada per la transformada de Fourier del gaussià, que seria:

$$\hat{g}(\omega) = e^{(-2\sigma^2\omega^2)} \tag{Eq. 8.2}$$

Així doncs tenim que l'ús del filtre gaussià es troba localitzat tant en el domini del temps com el de freqüències. Així si la desviació estàndard σ creix, el rang temporal, Δt , augmenta en tant el rang de freqüències $\Delta\omega$ cobert per el filtre gaussià disminueix i les freqüències més altres son eliminades del senyal original $f(t)$, o filtrades. La representació en tres dimensions del senyal, $F(t, \sigma)$, en funció de la desviació estàndard utilitzada (escala) i el temps (t) es coneix com a la imatge del filtre espai - escala.

De fet el que fem amb el filtre de gauss és desplaçar-lo al llarg del temps (u) per tal de calcular un valor mitjà de cada punt tenint en compte la presència dels punts propers en la posició u .

L'ús de diferents valors de la desviació estàndard (σ) fa que puguem obtenir el resultat de filtrar el senyal a diferents escales.

Avantatges i desavantatges del filtre de Gauss.

El filtre Gauss s'utilitza pel al filtrat multiescalar bàsicament perquè satisfà tots els requeriments descrits anteriorment per a un filtre. Dins dels avantatges en destacariem dos:

- ✓ Els punts d'inflexió no desapareixen si ens movem cap a descripcions més detallades. Es a dir, si utilitzem cada vegada σ més petites, els punts d'inflexió anteriors no desapareixen

- ✓ Si augment l'escala (augment de la σ) no apareixen punts d'inflexió ficticis, de forma que la representació multiescalar no implica l'aparició de noves tendències.

8.2 FILTRAT DE SENYALS AMB WAVELETS.

Les wavelets han experimentat en la darrera dècada una gran eina per a l'anàlisi de senyals. La primera aplicació de wavelets fou duta a terme per J. Morlet en el tractament de dades sísmiques (1984). La gran popularitat de les wavelets en part venen donada pel fet de que donen un marc uniforme per a varies tècniques de tractament de senyals i anàlisi funcional. Dins de les seves excel·lències destaquen les seves propietats de localització tan en l'espai de freqüències com en l'espai del temps i són molt adequades per al tractament de senyals amb una gran quantitat de variacions dins del període temporal del senyal.

8.2.1 Definició de les Wavelets.

Una família de wavelets prové de la dilatació i translació d'una funció inicial o mare. Si prenem $\psi(x)$ com la funció inicial, que anomenarem wavelet, els membres de la seva família vindran donats per:

$$\frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{x-u}{s}\right) \text{ on } (s,u) \in \mathbb{R}^2 \quad \text{Eq. 8.3}$$

Així, els diferents membres de la família de wavelets originaries de la wavelets mare $\psi(x)$ vindran determinats per dos subíndexs, s que indica la translació en l'espai del temps i u que n'indica la seva dilatació.

La wavelet $\psi(x)$ pertany a l'espai de les funcions integrables quadràticament $L^2(\mathbb{R})$. I satisfà la següent condició d'admissibilitat:

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad \text{Eq. 8.4}$$

on, $\hat{\Psi}(\omega)$ és la transformada de Fourier de $\psi(\omega)$

La condició de la Eq. 8.4 (anterior) implica que $\hat{\Psi}(0) = 0$ i que $\hat{\Psi}(\omega)$ és suficientment petit en l'entorn de $\omega = 0$. Usualment la wavelet $\psi(\omega)$ té algun tipus de decaïment a l'infinit i llavors la condició anterior (8.4) és equivalent a dir que el valor mig de $\psi(\omega)$ sigui zero, es a dir,

$$\hat{\Psi}(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(x) dx = 0. \quad \text{Eq. 8.5}$$

La transformació continua d'una senyal original $F(x)$ aplicant les wavelets vindria donada per la següent expressió:

$$W_{su}F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(x) \left\{ \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{x-u}{s}\right) \right\} dx \quad \text{Eq. 8.6}$$

i la reconstrucció de la funció original a partir de les seves transformades vindria donada per:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W_{su}F(x) \left\{ \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{x-u}{s}\right) \right\} ds du \quad \text{Eq. 8.7}$$

8.2.2 Discretització dels paràmetre de dilatació (s) i translació (u).

Els paràmetres de les wavelets, s i u , cal discretitzar-los a fi i efecte de poder-les utilitzar en aplicacions pràctiques. Usualment, el paràmetre d'escala s és discretitzat al llarg de la seqüència dyàdica:

$$s = 2^m \quad , \quad m \in Z \quad \text{Eq. 8.8}$$

La discretització del paràmetre s no cal que sigui necessàriament diàdica i es poden utilitzar altres tipus de discretitzacions. En referència al paràmetre de translació u es disposen de dues opcions de discretització possibles. L'aproximació clàssica de Meyer (1986) proposa agafar valors de u uniformement al llarg dels intervals diàdics:

$$u = \alpha 2^m k \quad , \quad (m, k) \in Z^2 \quad \text{Eq. 8.9}$$

Com alternativa a la discretització del paràmetre u , existeix la possibilitat de pendre intervals constants per a totes les escales (Mallat, 1991),

$$u = n \quad , \quad n \in Z \quad \text{Eq. 8.10}$$

L'ús de la discretització del paràmetre de translació segons Meyer implica efectuar translacions de les wavelets per a diferents intervals en funció de l'escala escollida (m). Així per a $m=0$ tindriem translacions a $(0, \alpha, 2\alpha, \dots, k_{\max}\alpha)$ i per $m=1$ a $(0, 2\alpha, 4\alpha, \dots, k_{\max}\alpha)$. L'ús de però d'una discretització de Meyer en l'aplicació de les wavelets implica una no invariancia deguda al procés de translació, cosa que dificulta l'ús d'aquesta discretització per al reconeixement de comportaments en senyals. L'ús de la discretització de Mallat el paràmetre de translació u és independent de l'escala i és més favorable per a l'ús en el reconeixement de comportaments.

8.2.3 Tipus de Wavelets

Existeixen varies funcions que compleixen la condició necessària per a ser considerades wavelets, tot i així, les més utilitzades serien els splines, Daubechies,

Maxflat i Symlets. Dins de cada família de wavelets es poden escollir diferents tipus, en funció bàsicament del grau d'esmoreïment que es vulgui assolir.

El procés de filtrat d'una senyal segueix un esquema com el mostrat en la figura 8.1, on es poden diferenciar dues fases independents: la descomposició i la reconstrucció del senyal original.

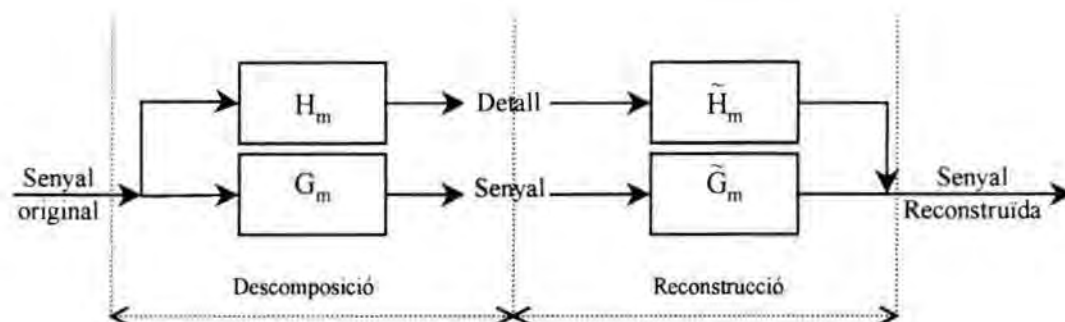


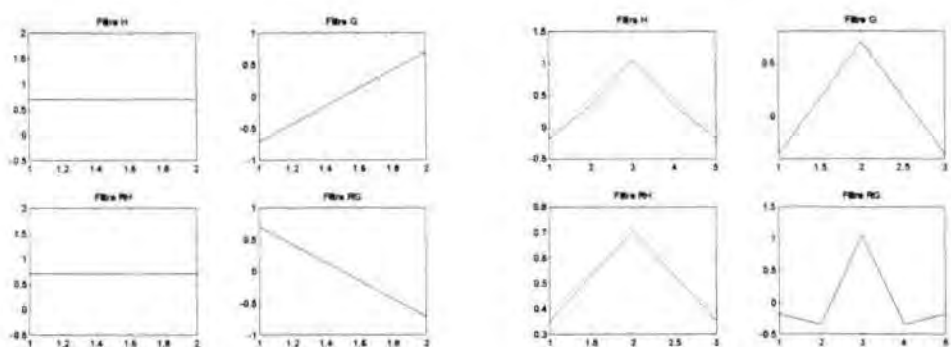
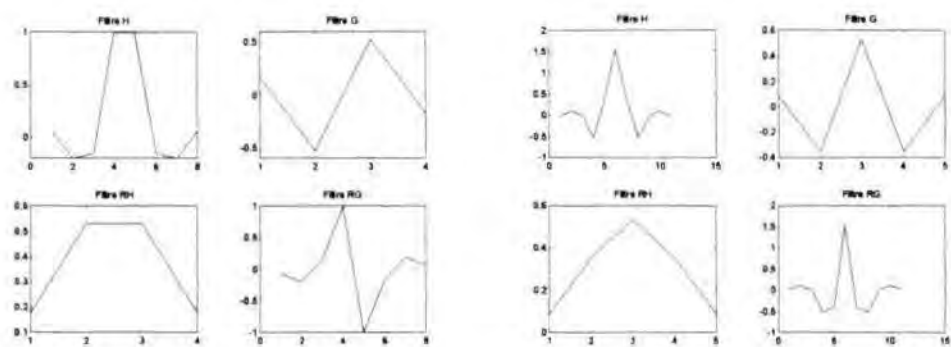
Figura 8.1. Descomposició i reconstrucció d'un senyal.

Per elaborar-ne la descomposició es necessiten dos filtres, H_m (filtre de pas baix) i G_m (filtre de pas alt) que transformen el senyal original en dues, el detall i el senyal filtrat. La reconstrucció posterior s'efectua a partir de les seves inverses, \tilde{H}_m i \tilde{G}_m . Un cop escollides les wavelets, el que obtenim és la definició dels filtres corresponents a la descomposició i reconstrucció del senyal. A continuació es mostren les formes que experimenten aquests filtres en funció del tipus de wavelets utilitzades.

8.2.3.1 Splines

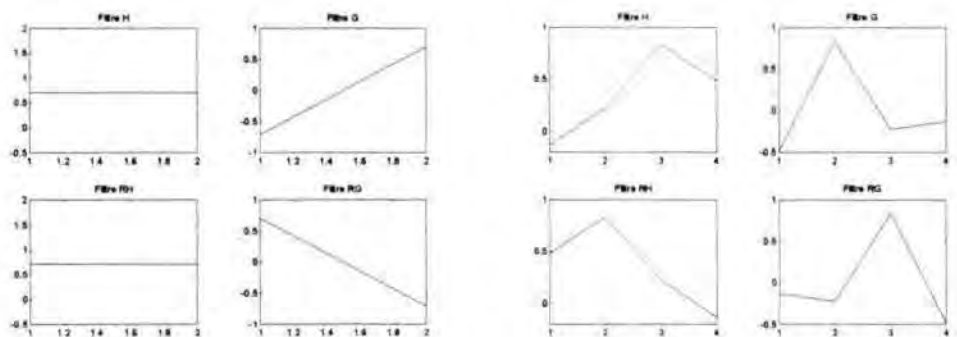
Les wavelets d'splines venen definides per dos coeficients n i m enters positius que indiquen el número de zeros en $z=-1$ dels filtres de pas baix de descomposició i reconstrucció respectivament i compleixen la condició de que $n+m$ és parell.

En els gràfics següents es mostren les formes dels filtres H_m , G_m , \tilde{H}_m i \tilde{G}_m expressats segons l'expressió *Splines n:m* on n i m corresponent als paràmetres de definició de les wavelets d'splines.

*Splines 1:1**Splines 2:2**Splines 3:3**Splines 4:4**Figura 8.2. Wavelets d'splines per a diferents valors de n i m .*

8.2.3.2 Daubechies

Les wavelets de Daubechies venen determinades per un únic paràmetre n que indica el nombre de coeficients que es volen tenir, on $n/2$ és el nombre de zeros en $z=-1$. Novament n ha de ser parell.

*Daubechies 2**Daubechies 4*

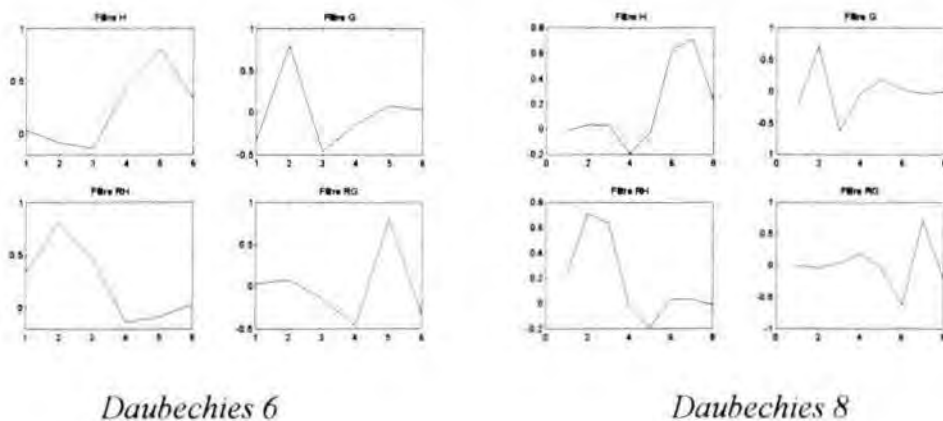


Figura 8.3. Wavelets de Daubechies per a diferents valors de n .

8.2.3.3 Maxflat

Els filtres Maxfalt depenen novament de dos paràmetres n i m . A fi i efecte de que els filtres obtinguts siguin ortonormals s'ha de complir la condició de que $n=m$. El valor de n indica el grau d'aplanament a una freqüència $\omega=0$ i $m-1$ correspondria a l'aplanament a un freqüència ω de π radians.

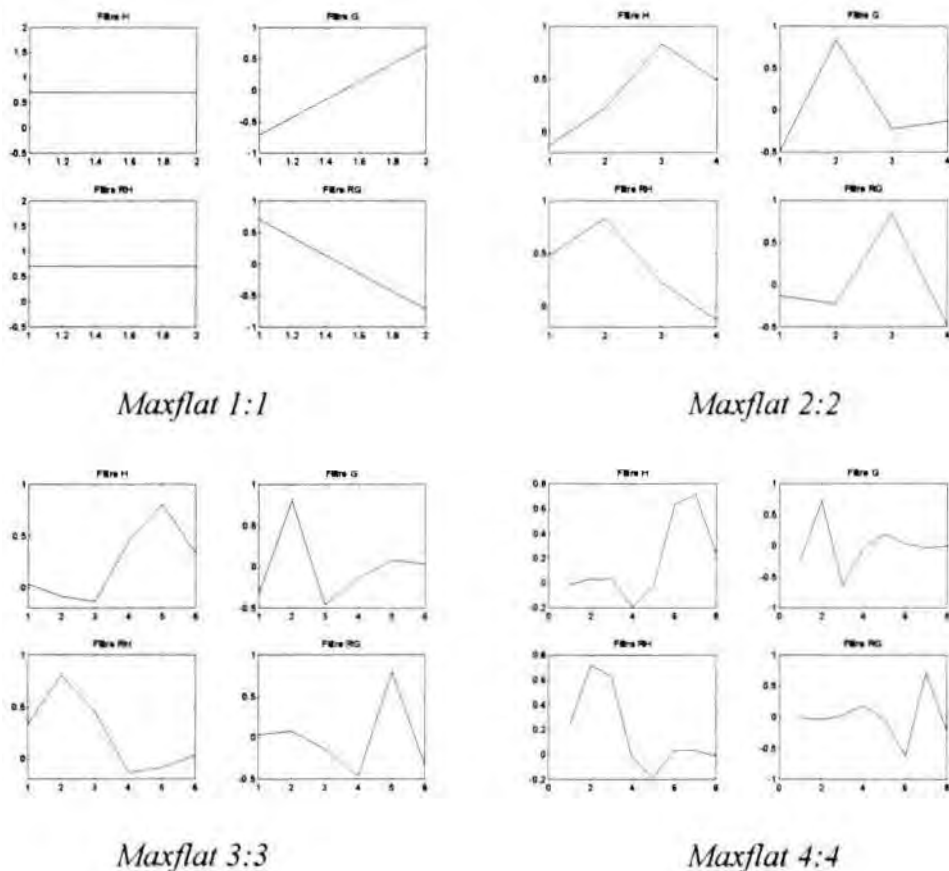


Figura 8.4. Wavelets de Maxflat per a diferents valors de n i m .

8.2.3.4 Symlets

Les wavelets del tipus Symlets tenen el seu origen en les de Daubechies, utilitza un únic paràmetre n , que n'indica el nombre de coeficients. La condició és que el nombre de coeficients ha de ser parell.

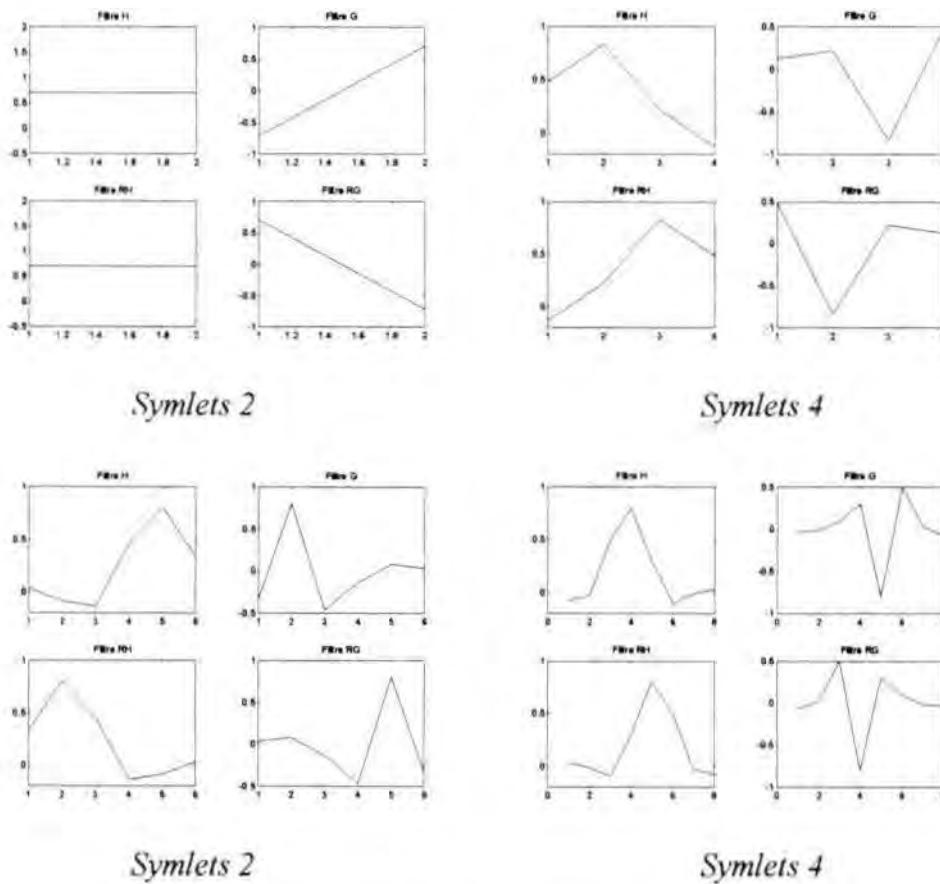


Figura 8.5. Wavelets de Symlets per a diferents valors de n .

8.2.4 Transformada de wavelet. Base de filtra t.

La transformada de wavelet és el resultat d'efectuar el procés de descomposició d'una senyal a partir d'un esquema definit format per els filtres de pas baix i alt de les wavelets seleccionades.

El procés de descomposició del senyal vindrà determinat per la base escollida. Així, la base de filtrat és l'esquema successiu de filtres de pas alt i baix a seguir per a descompondre una senyal i obtenir-ne la seva transformada de wavelet. El coneixement de la base utilitzada per a la descomposició d'una senyal ens permetrà en una operació posterior reconstruir el senyal original.

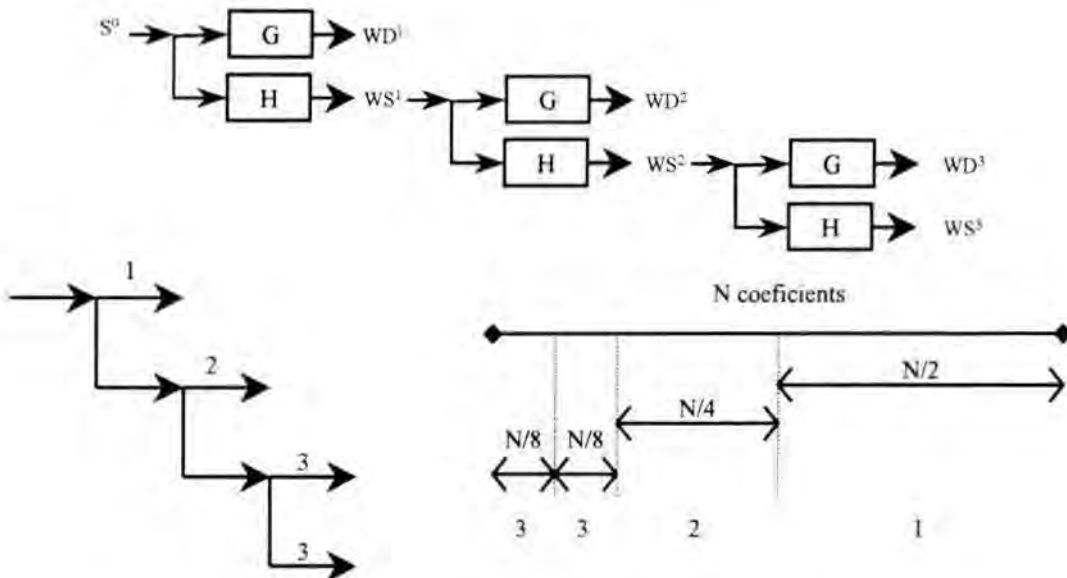


Figura 8.6. Base de filtrat i repartiment dels coeficients dins de cada banda generada.

Si es pren l'esquema de filtrat que es mostra en la figura 8.6, el senyal original S^0 es descompon en dues subbandes a partir de la transformada de wavelet, WD^1 i WS^1 corresponents a l'aplicació dels filtres de pas alt (G) i pas baix (H). WD^1 correspondria a la subbanda del detall del senyal, en tant que WS^1 correspon a la subbanda del senyal a un escala superior, es a dir 1. La subbanda corresponent a el senyal, WS^1 , es pot tornar a filtrar amb els filtres H i G per tal d'obtenir la transformada de wavelet a escales superiors. En l'exemple mostrat en la figura 8.6 s'arriba a una escala de 3 i obtindriem una transformada de wavelet formada per 4 tipus de coeficients o subbandes: WD^1 , WD^2 , WD^3 i WS^3 . Aquesta descomposició correspondria a un esquema de filtrat o base de filtrat $[3,3,2,1]$.

La base utilitzada per filtrar el senyal original pot esdevenir molt més complexa, però en qualsevol cas podrem representar l'esquema a partir de la base, així un esquema de filtrat segons la base $[4,4,3,2,2,3,3]$ equivaldria a seguir l'esquema de

la figura 8.7. En la mateixa figura 8.7 es mostren el numero de coeficients per a cada subbanda.

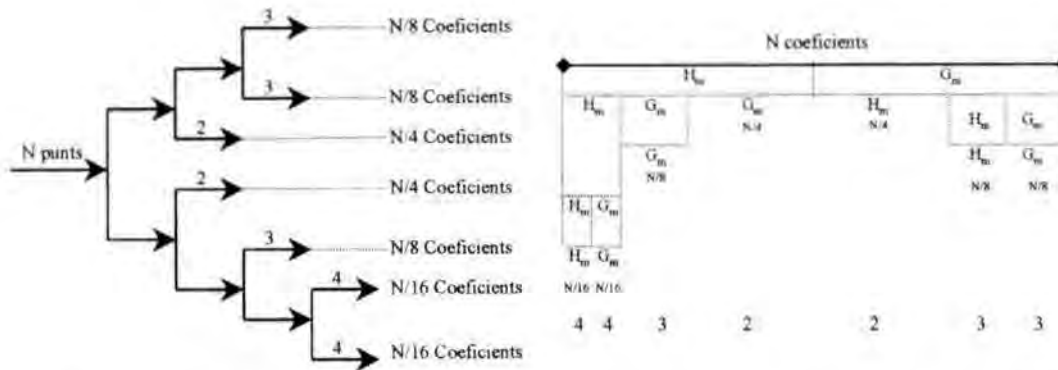


Figura 8.7. Esquema de filtrat segons una base $[4, 4, 3, 2, 2, 3, 3]$ i número de coeficients per a cada subbanda.

La transformada discreta de wavelet serà una relació finita de coeficients cadascun d'ells amb un valor determinat. El nombre de coeficients obtinguts en la transformada de wavelet equival al nombre de punts del senyal original. El fet d'efectuar el filtrat del senyal amb els filtres H i G divideix el senyal en dues subbandes de forma que el nombre de coeficients es reparteix entre les dues. Així, per al primer filtrat del senyal, obtindriem $N/2$ coeficients corresponents a la subbanda del detall WD^1 , i $N/2$ coeficients per la subbanda del senyal WS^1 . A mesura que efectuem filtres successius de la subbanda del senyal, anem obtenint noves subbandes amb un número de coeficients igual a la meitat de la subbanda filtrada. Així, el nombre final de coeficients que obtenim per a cada subbanda depèn de l'escala on ens trobem, essent el número de coeficients per a una subbanda d'escala s de $N/2^s$ tal i com es mostra en la figura 8.7.

8.2.4.1 Necessitats i condicions per efectuar un filtrat amb wavelets.

Les condicions del senyal per efectuar un filtrat amb wavelets es basaran en part en el tipus de discretització escollida per calcular la transformada discreta de wavelet. Si prenem com a estàndard la discretització diàdica per al terme d'escala llavors el nombre de punts necessaris per efectuar una anàlisi multiescalar ha de ser una potència de 2, es a dir 2^n . En el cas de que el nombre de punts disponibles

no sigui igual a 2^a caldrà donar valors a el senyal o eliminar els punts necessaris per assolir una potència de dos. Si ens preguntem fins a quina escala podem arribar, aquesta també vindrà limitada per el nombre de punts disponibles. Amb una senyal de 2^a punts no es pot efectuar una anàlisi multiescalar amb una escala superior de a . Així si tenim una senyal formada per 256 punts (2^8) l'escala màxima que podem assolir serà de 8, que correspondria a disposar de un únic punt per a les subbandes d'escala 8.

8.2.4.2 Càlcul de la transformada de wavelet. Exemple.

Per mostra la forma que prenen les transformades de wavelet i la manera de tronar a reconstruir el senyal original, utilitzarem un senyal fictici format per la suma de tres característiques individuals.

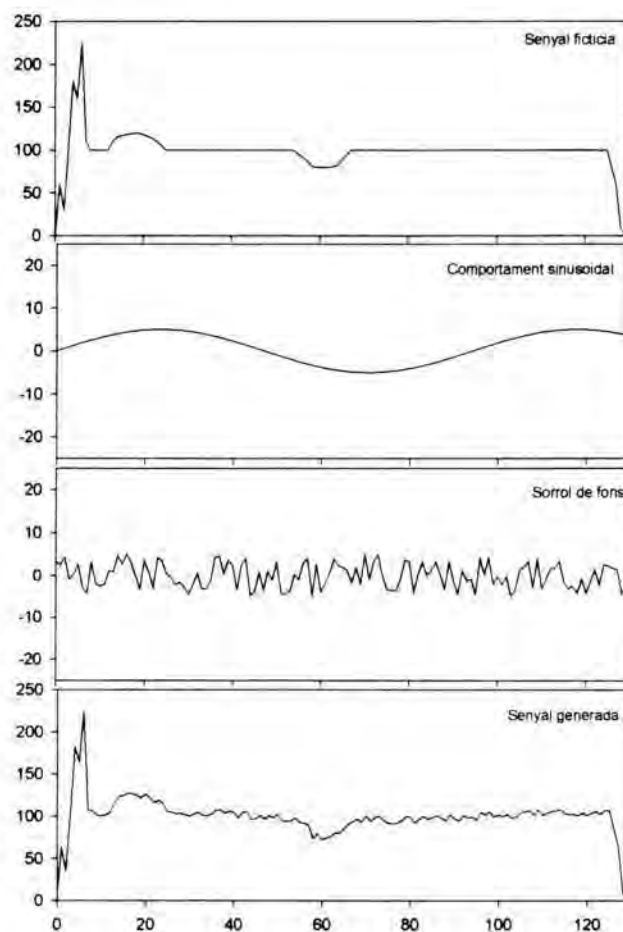


Figura 8.8. Generació d'una senyal artificial com la suma de 3 components .

En la figura 8.8 es mostra com es genera el senyal fictici a partir de les tres característiques independents. La primera correspondria a un comportament propi d'un sistema qualsevol, la segona faria referència a un comportament sinusoidal inherent al sistema i la darrera de les característiques correspondria a un soroll de fons. La suma de les tres components ens donarà el senyal fictici que utilitzarem per a la seva descomposició i posterior reconstrucció. El senyal esta format per un total de 128 punts (2^7) i per tant com a màxim podrem efectuar fins a un màxim de 7 filtrats consecutius, es a dir una escala màxima de 7.

Descomposició.

Si utilitzem una base de filtrat [3,3,2,1] tal i com es mostra en la figura 8.6 i utilitzem per a la descomposició les wavelets tipus splines 3:3 obtindrem les transformades de wavelet de la figura 8.9.

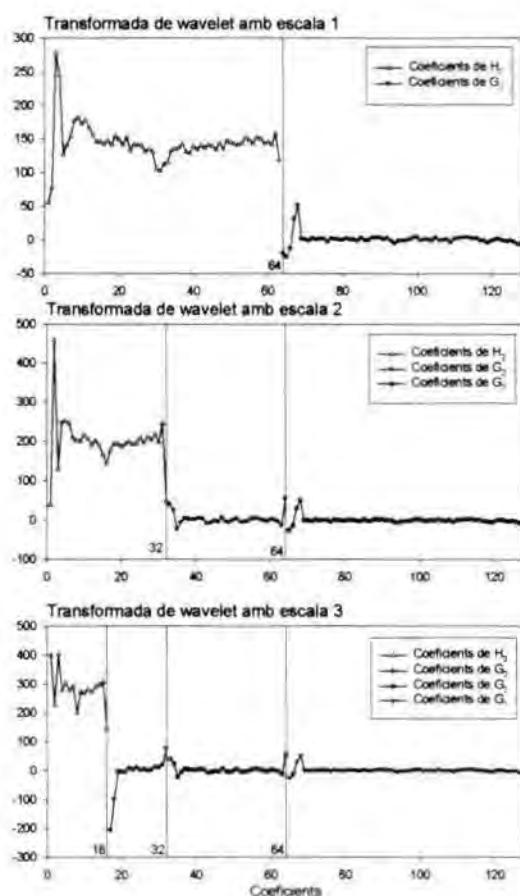


Figura 8.9. transformades de wavelet fins a l'escala 3.

En la figura 8.9 es pot veure com a mesura que augmenta l'escala, el nombre de coeficients de cada subbanda es redueix a la meitat, passant de 64 coeficients per al detall de l'escala 1 a 16 coeficients per a les subbandes del detall i el senyal per a l'escala 3.

Reconstrucció.

La reconstrucció del senyal original s'efectuaria partir de la mateix base[3, 3, 2, 1] però utilitzant les inverses dels filtres H i G tal i com es mostra en la figura 8.10.

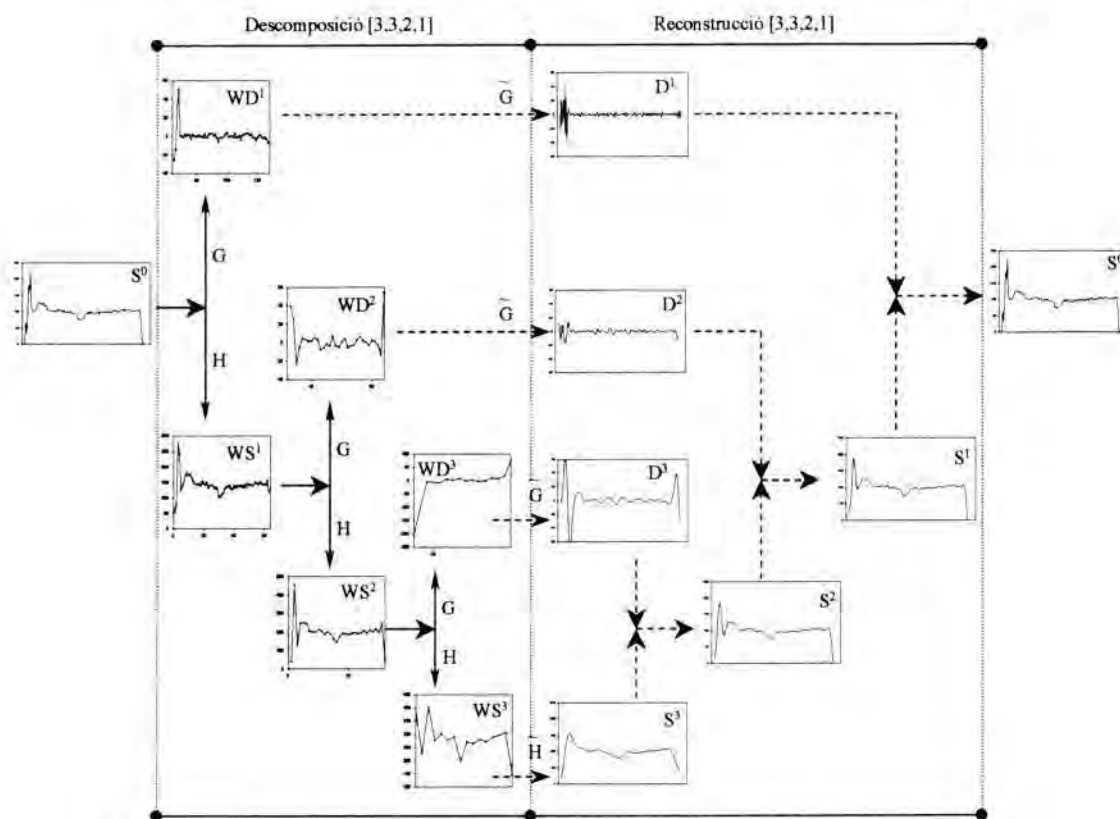


Figura 8.10. Descomposició i reconstrucció d'una senyal S^0 segons la base [3,3,2,1] utilitzant splines 3:3.

Tant el càlcul de la transformada de wavelet com la reconstrucció posterior del senyal s'han efectuat a partir de la llibreria de wavelets per a Matlab que ofereix de forma gratuïta la Universitat de Vigo.

8.2.5 Anàlisi multiescalar de dades discretes.

Si ens fixem en la figura 8.10 on es mostra el procés de descomposició i reconstrucció d'una senyal fictícia, podrem observar com per a cada escala obtenim un nou valor del senyal i un detall. Així per a l'escala 1 el senyal original S^0 s'ha dividit en dos, S^1 i D^1 , corresponents a el senyal i al detall expressats a l'escala 1. Posteriorment, el senyal S^1 s'ha dividit novament en dos, S^2 i D^2 , el senyal i el detall ara a escala 2. Una tercera descomposició de S^2 ens donarà el detall D^3 i el senyal S^3 corresponents a l'escala 3.

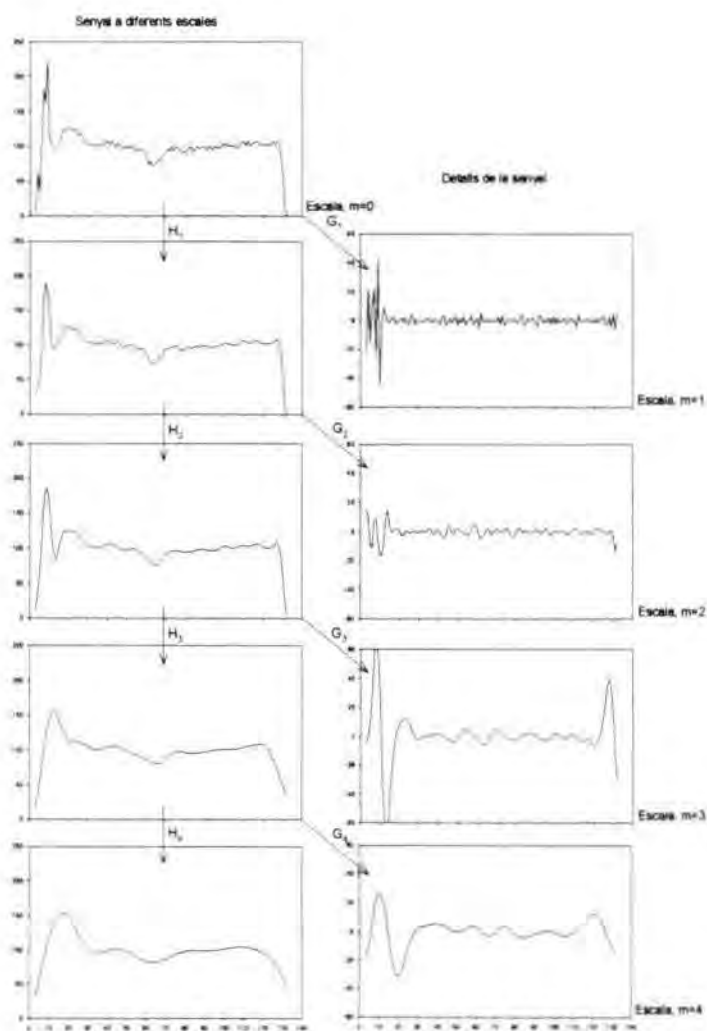


Figura 8.11. Anàlisi multiescalar d'una senyal artificial.

En la figura 8.11 es mostren únicament les gràfiques corresponents a les senyals filtrades i als detalls de cadascuna de les escales obtingudes. Aquesta representació es coneix amb el nom d'anàlisi multiescalar d'una senyal.

Com a definició de l'anàlisi multiescalar fins a l'escala n podríem dir que és la representació gràfica dels successius detalls i senyals que s'obtenen utilitzant una base del tipus $[n, n, n-1, n-2, \dots, 1]$ utilitzant un filtre de wavelets definit. Així la figura 8.11 correspondria a l'anàlisi multiescalar d'escala 4 del senyal fictícia S^0 .

Les senyals obtingudes a diferents escales (S^1, S^2, S^3 i S^4) correspondrien a efectuar l'antitransformada de wavelet a partir de la transformada de wavelet de la seva escala i donant el valor de zero a els coeficients corresponents a les subbandes dels detalls. Així, per obtenir el senyal S^3 de la figura 8.10 caldria prendre la transformada de wavelet de la figura 8.9 i donar el valor de zero als coeficients corresponents a les subbandes dels detalls D^1, D^2 i D^3 tal i com es mostra en la figura 8.12.

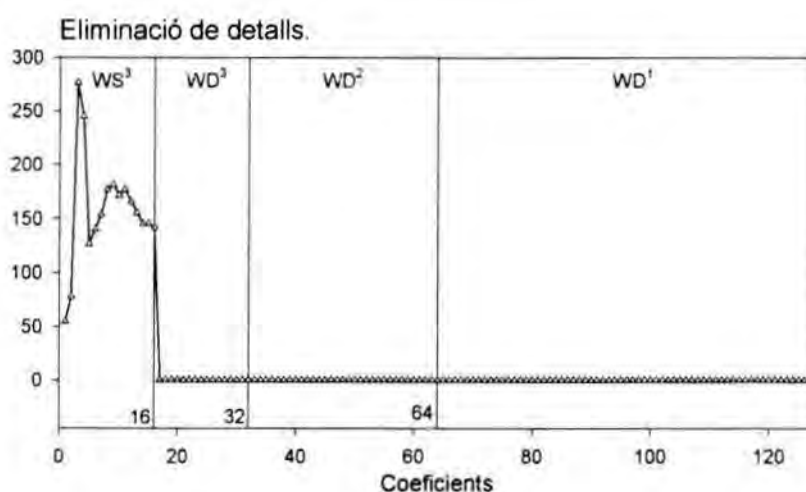


Figura 8.12. Eliminació dels detalls. Transformada de wavelet modificada.

8.2.6 Eliminació de característiques. Esmorteïment de senyals.

L'anàlisi multiescalar correspon a una forma estàndard d'obtenir les successives escales d'una senyal original a partir d'una base de filtrat del tipus $[n, n, n-1, n-2, \dots, 1]$ on n equival a l'escala màxima assolida. L'elecció d'un altre esquema de filtrat o base també es possible en el càlcul de la transformada de wavelet.

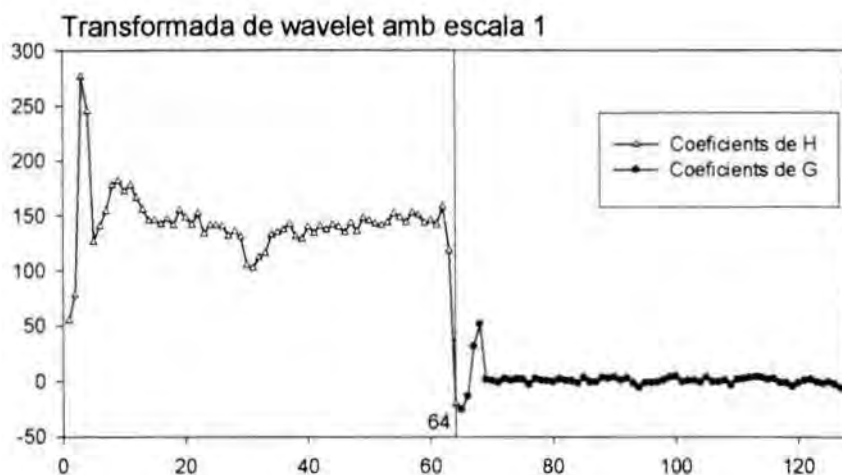


Figura 8.13. Transformada de wavelet segons una base [1,1] del senyal fictici.

Partint del senyal fictici generada en la figura 8.8, utilitzant les wavelets de splines 3:3, i una base de filtrat [1,1], la transformada de wavelet obtinguda es mostra en la figura 8.13. El nombre de coeficients obtinguts en cadascun dels filtres, H i G, és de 64 i es mostren en la taula 8.1 on els coeficients del 1-64 corresponen al filtre de pas baix H i del 65 al 128 al filtre de pas alt G.

| Coeficients 1-64. Filtre de pas baix H. | | | | | | | | |
|--|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Nº Coef. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Valor | 54.7 53 | 78.001 | 276.633 | 245.450 | 126.380 | 140.297 | 153.963 | 177.588 |
| Nº Coef. | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Valor | 181. 411 | 171.851 | 177.666 | 165.951 | 155.606 | 145.250 | 145.336 | 141.991 |
| Nº Coef. | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| Valor | 146. 711 | 140.798 | 154.720 | 148.081 | 141.425 | 151.768 | 133.333 | 141.014 |
| Nº Coef. | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| Valor | 140. 759 | 140.000 | 131.332 | 135.255 | 130.143 | 105.219 | 101.979 | 112.054 |
| Nº Coef. | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| Valor | 115. 453 | 132.201 | 134.392 | 136.615 | 142.080 | 130.438 | 128.246 | 139.192 |
| Nº Coef. | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |
| Valor | 133. 692 | 140.086 | 136.728 | 141.362 | 139.227 | 134.057 | 143.004 | 135.300 |
| Nº Coef. | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 |
| Valor | 147. 306 | 144.802 | 142.132 | 140.574 | 143.245 | 151.558 | 148.111 | 143.386 |
| Nº Coef. | 57 | 58 | 59 | 60 | 61 | 62 | 63 | 64 |
| Valor | 152. 104 | 150.168 | 142.905 | 145.348 | 141.459 | 157.936 | 118.297 | -20.285 |
| Coeficients 65-128. Filtre de pas alt G. | | | | | | | | |
| Nº Coef. | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 |
| Valor | - 25.6 23 | -13.485 | 31.136 | 51.214 | 1.358 | 0.365 | -1.341 | 2.113 |

| | | | | | | | | |
|----------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Nº Coef. | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 |
| Valor | 0.47 3 | 1.616 | 1.444 | -2.967 | 2.234 | 0.576 | 0.190 | -0.700 |
| Nº Coef. | 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 |
| Valor | 1.82 4 | 0.357 | 0.169 | -1.982 | 3.042 | -0.978 | -1.111 | 3.206 |
| Nº Coef. | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 |
| Valor | 2.41 1 | 3.392 | 0.547 | 2.648 | -1.589 | -5.773 | -1.539 | -1.170 |
| Nº Coef. | 97 | 98 | 99 | 100 | 101 | 102 | 103 | 104 |
| Valor | - 1.12 7 | 0.503 | 3.295 | 4.140 | -0.677 | 0.191 | 0.478 | -1.202 |
| Nº Coef. | 105 | 106 | 107 | 108 | 109 | 110 | 111 | 112 |
| Valor | 3.47 6 | -0.856 | -0.656 | 0.703 | -3.887 | 1.325 | 1.946 | 2.971 |
| Nº Coef. | 113 | 114 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 |
| Valor | 3.69 9 | 3.280 | 1.382 | 2.281 | -1.375 | -1.476 | -4.854 | -1.673 |
| Nº Coef. | 121 | 122 | 123 | 124 | 125 | 126 | 127 | 128 |
| Valor | 0.68 1 | 1.750 | -0.850 | -2.170 | -0.918 | -2.923 | -6.341 | -6.697 |

Taula 8.1. Coeficients de la transformada de wavelet segons la base de filtrat [1,1].

En l'anàlisi multiescalar, l'extracció dels detalls i de les senyals a diferents escales es basava en l'eliminació dels coeficients del filtre de pas alt G. D'aquesta forma anàvem extraient les diferents gràfiques a escales superiors. L'eliminació de tots els coeficients d'una de les bandes generades es considera com l'eliminació de part del soroll de fons del senyal original donat que el valor dels seus coeficients és inferior als coeficients corresponents al filtre de pas baix H.

L'ús de l'anàlisi multiescalar pot provocar la pèrdua de característiques del senyal que en un principi no desitjàvem eliminar. Observant acuradament la transformada de wavelet, es poden identificar, dins dels coeficients corresponents a la banda del detall (65-128), quatre coeficients molt diferents de la resta. Aquests coeficients 65, 66, 67 i 68 es troben ressaltats en negreta en la taula 8.1 i difereixen prou de la resta. La importància d'aquests coeficients en la reconstrucció del senyal es mostra en la figura 8.14.

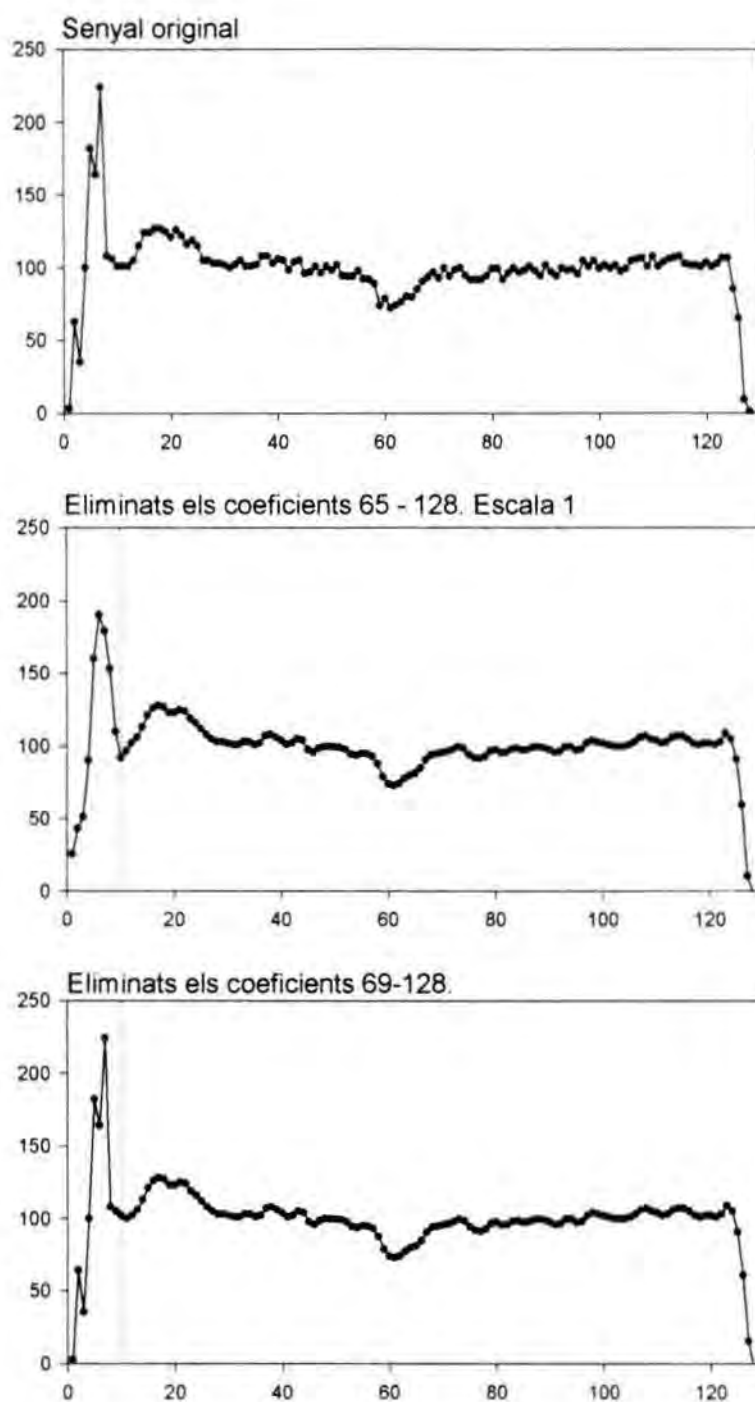


Figura 8.14. Filtrat del senyal fictici eliminant una subbanda entera o part dels coeficients.

L'eliminació dels coeficients 65-68 comporta l'obtenció d'una senyal filtrada prou diferenciada. Tornant a la figura 8.14, i observant el comportament del senyal fins a la posició 8, s'observa com aquest coeficients que hem eliminat corresponien a les petites pujades i baixades de experimenta el senyal original abans d'arribar al

seu màxim. L'eliminació d'aquests coeficients (escala 1), esmorteïx el pic inicial suavitzant-lo i donant-li una forma sinusoidal.

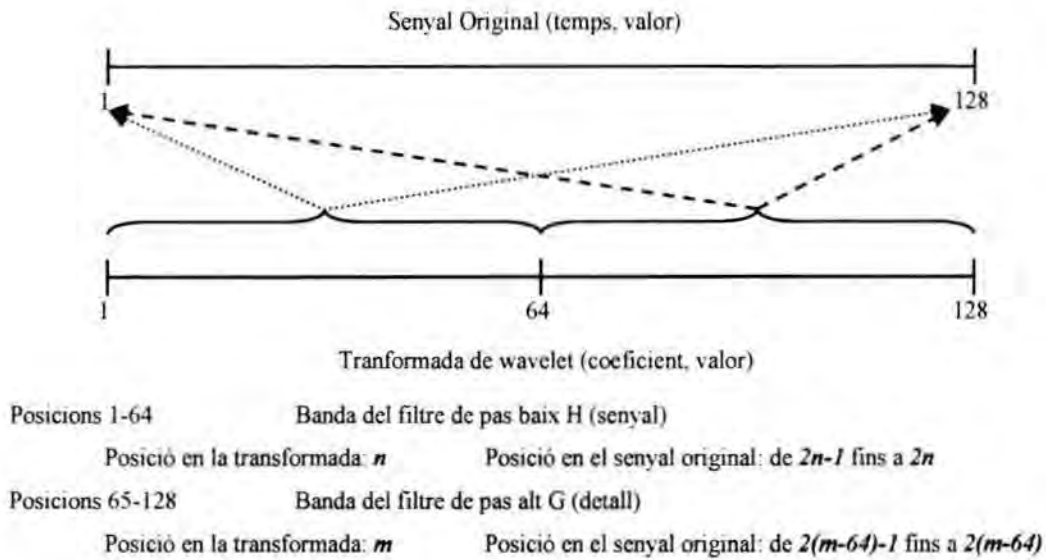


Figura 8.15. Relacions entre el senyal original i la transformada de wavelet segons una base $[1, 1]$.

La importància de cada coeficient en la reconstrucció del senyal radica en el valor del coeficient i la posició d'aquest en la transformada de wavelet. Cada banda de coeficients obtinguda en el procés de descomposició del el senyal original conté informació de tot el domini temporal del senyal. Així, si el senyal inicial disposa de 128 punts i el filtrat segueix un base $[1, 1]$, s'obtenen dues bandes de 64 coeficients. Per a cada banda, el primer coeficient fa referència a l'interval format per les posicions 1-2 del senyal original, el segons per a les posicions 3-4 i així successivament tal i com es mostra en la figura 8.15 i l'explicació que l'acompanya.

La relació entre la posició del coeficient i la posició del senyal fa que en qualsevol moment sapiguem en quina posició del senyal estem treballant en el moment en que eliminem un coeficient. El mateix que efectuem a partir de la transformada segons la base $[1, 1]$ ho podem avaluar per a altres bases de filtrat. Com que el valor que pren cadascun dels coeficients de la transformada de wavelet depèn directament de la base de filtrat, caldrà doncs escollir una base de filtrat idònia per a diferenciar correctament els coeficients que tenen una importància relativa al

comportament del senyal dels que tan sols representen un soroll de fons. L'elecció de la base de filtrat pot efectuar-se de forma aleatòria o seguin algorismes d'elecció automàtica de la base.

8.2.6.1 Algorismes d'elecció automàtica de la Base.

L'elecció d'una base de filtrat a partir d'una funció de cost es pot efectuar partint d'algorismes de compressió o expansió de la base. La base de filtrat estarà expandida al màxim quant en una senyal de 2^N punts la base escollida sigui $[N, N, N, \dots$ fins a N vegades $N]$; es a dir, quant el nombre de bandes sigui igual al de punts i el nombre de coeficients per a cada banda la unitat. La base de filtrat comprimida al màxim és $[1, 1]$ independentment del nombre de punts del senyal original. El nombre de coeficients per a cadascuna de les bandes serà però de $2^N/2$, si 2^N és el nombre de punts del senyal original.

L'elecció de la base s'efectua a partir d'una funció de cost, que pot ser o no additiva. A continuació es mostren les funcions de cost que es troben en el Toolbox de la Universitat de Vigo. Per a les funcions de cost es defineixen els següents símbols:

- C_p , Cost dels coeficients de la transformada de wavelet en funció del paràmetre p .
- N nombre de punts de la transformada de wavelet.
- wt Transformada de wavelet, vector de N elements.
- owt Transformada de wavelet on els coeficients han estat ordenats en ordre decreixent, vector de N elements

Àrea de compressió, funció no additiva:

$$C_p = N - \sum_{i=1}^N \left[\frac{\sum_{j=1}^i owt_j^p}{\sum_{j=1}^N owt_j^p} \right]$$

Compressió de numèrica, funció no additiva:

$$C_p = \min_{i=1}^N \left\{ \frac{\sum_{j=1}^i owl_j^2}{\sum_{j=1}^N owl_j^2} - p \right\}$$

Entropia de Coifman-Wickerhauser, funció no additiva:

$$n = \sqrt{\sum_{i=1}^N wt_i^2} \quad ; \quad \text{Si } wt_i = 0 \Rightarrow wt_i = n$$

$$C_p = \sum_{i=1}^N \left[-\frac{wt_i^2}{n} \log\left(\frac{wt_i^2}{n}\right) \right]$$

Funció amb pesos normalitzats, funció no additiva:

$$C_p = \max_{i=1}^N \left[owl_i \cdot i^{\frac{1}{p}} \right]$$

Funció d'energia, funció additiva:

$$\text{Si } wt_i = 0 \Rightarrow \delta_i = 1.0 \quad ; \quad \text{Si } wt_i \neq 0 \Rightarrow \delta_i = 0.0$$

$$C_p = \sum_{i=1}^N \log(wt_i^2 + \delta_i)$$

Funció exponencial, funció additiva:

$$C_p = \sum_{i=1}^N |wt_i|^p$$

Funció relativa a l'Entropia de Shannon, funció additiva:

$$\text{Si } wt_i = 0 \Rightarrow \delta_i = 1.0 \quad ; \quad \text{Si } wt_i \neq 0 \Rightarrow \delta_i = 0.0$$

$$C_p = \sum_{i=1}^N \left[(wt_i^2 + \delta_i) \log(wt_i^2 + \delta_i) \right]$$

Per norma general cap metodologia d'elecció de base, tant si parteix de la base més senzilla cap a la més complexa (*growing*) com el procés invers (*pruning*), és millor que cap altra. Dependrà en cada cas en funció de les wavelets utilitzades, els coeficients de la funció de cost (p) o el tipus de senyal que estem processant.

8.3 RESULTATS. APLICACIÓ DEL FILTRAT AMB WAVELETS.

L'ús de les wavelets per al filtrat de senyals ens ve determinat per dues característiques: el tipus de wavelets escollides i la metodologia escollida per la descomposició - reconstrucció del senyal.

Selecció de wavelets. L'elecció d'unes o altres wavelets depèn de quin sigui l'objectiu del procés de filtrat. Si el que volem és obtenir valors mitjans del senyal utilitzarem wavelets amb un grau de suavització baix, per exemple uns splines(1:1) o uns Daubechies(2). Si ens interessa esmorteir un efecte oscil·latori important degut en part per un soroll de fons o una variabilitat excessiva del senyal les wavelets utilitzades correspondran a aquelles amb un nombre de coeficients molt més elevats per tal d'esmorteir el senyal i suavitzar-ne el comportament. L'opció escollida vindrà determinada en gran part per el tipus de senyal obtinguda i l'aplicació posterior que desitgem donar a el senyal.

Descomposició i reconstrucció del senyal. La base utilitzada per a la descomposició del senyal original ens determinarà la forma de la transformada de wavelet. Si utilitzem una base de filtrat normalitzada, la reconstrucció posterior del senyal ens generarà el diagrama multiescalar, en tant que si utilitzem algorismes automàtics de selecció de base, la reconstrucció del senyal pot efectuar-se de diferents formes.

A continuació es mostraran com afecta la selecció de les wavelets i la metodologia de filtrat per a diverses senyals obtingudes a partir de la monitorització d'un equip de i el sistema d'adquisició de dades de la depuradora d'aigües residuals urbanes de Tarragona.

8.3.1 Aplicació de les wavelets a una Respirometria.

La respirometria consisteix en l'obtenció d'una seqüència temporal de l'evolució de l'oxigen dissolt en una solució de fangs actius en la que s'hi ha efectuat alguna pertorbació. Les principals pertorbacions serien la modificació de les condicions

d'aeració i l'addició de petites quantitats de dissolucions biodegradables. La representació gràfica de l'evolució de l'oxigen dissolt es coneix com a respirograma (figura 8.16).

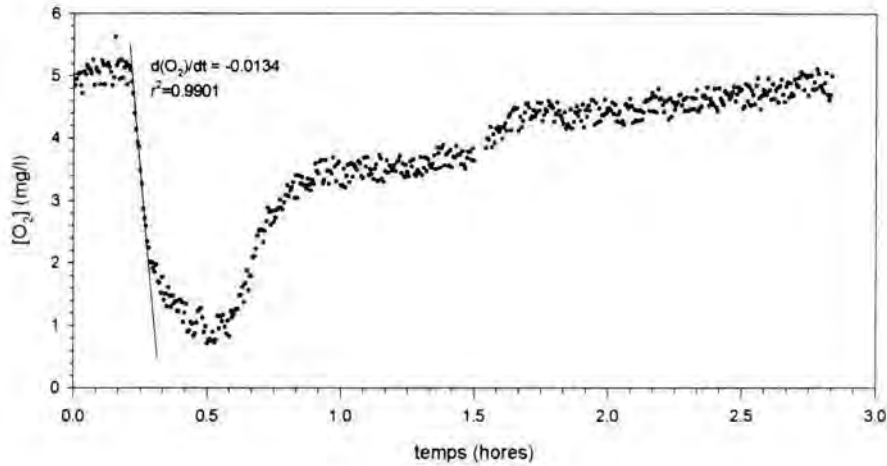


Figura 8.16. Respirograma d'un sistema de llots actius.

Amb l'anàlisi del respirograma es poden determinar paràmetres cinètics o de composició tant de la biomassa com de l'aigua residual. La major part dels paràmetres es calculen a partir les pendents que presenta la corba. Si el respirograma no presenta una forma molt definida, sense moltes oscil·lacions, el càlcul dels pendents de la corba poden resultar erronis. En la figura 8.16 es mostra també la recta de regressió obtinguda en el punt en que la concentració d'oxigen comença a disminuir de forma pronunciada.

8.3.1.1 Característiques de les dades.

La seqüència de valors de concentració d'oxigen que estudiarem consta de 504 punts repartits uniformement cada 20 segons durant un període de 2 hores 50 minuts. Per tal d'ajustar en numero de punts a una potència de 2, s'afegeixen 8 punts al final del respirograma. Amb 512 punts l'escala màxima a la que podem arribar és de 9 ($2^9=512$).

A continuació s'efectuarà el filtrat de les dades originals per tal de determinar l'eficàcia de les wavelets en la determinació del pendent màxim que presenta el respirograma.

8.3.1.2 Anàlisi multiescalar.

Compararem en aquest cas l'anàlisi multiescalar utilitzant splines 1:1 i 3:3 que es mostren en les figures 8.17 i 8.18.

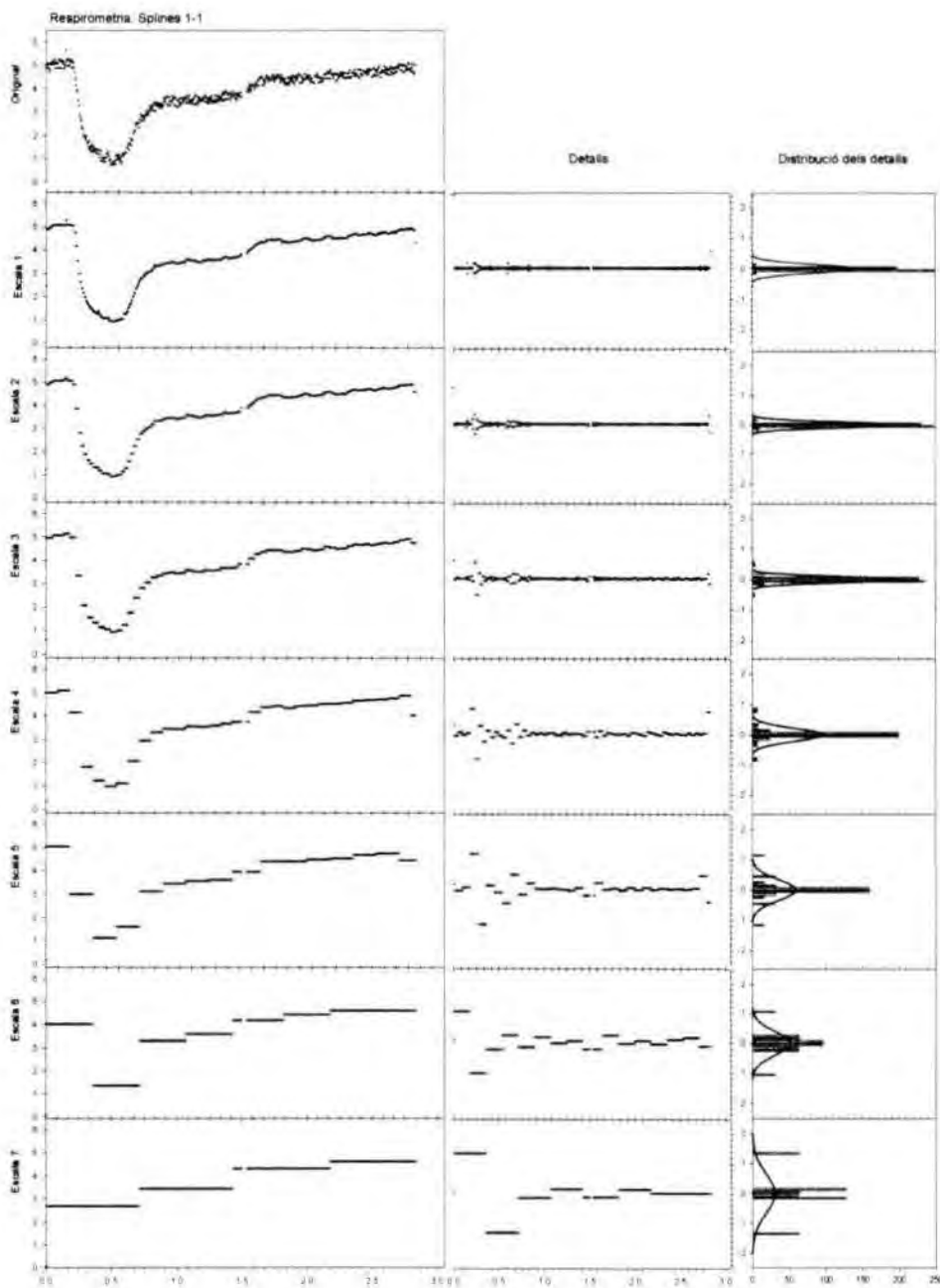


Figura 8.17. Anàlisi multiescalar d'una respirometria utilitzant splines 1:1.

En les figures de l'anàlisi multiescalar es mostren 3 columnes de gràfiques. La primera d'elles correspon a el senyal filtrada a diferents escales, des de la seva forma original fins a l'escala 7. La segona columna correspon als detalls, es a dir, la diferència entre el senyal a l'escala N i el senyal a l'escala $N-1$. Finalment la tercera columna de gràfics correspon a la distribució dels detalls. En la distribució de detalls es representa en un diagrama horitzontal de barres la freqüència en que un valor es repeteix i s'ajusta la corba de Gauss que li correspondria.

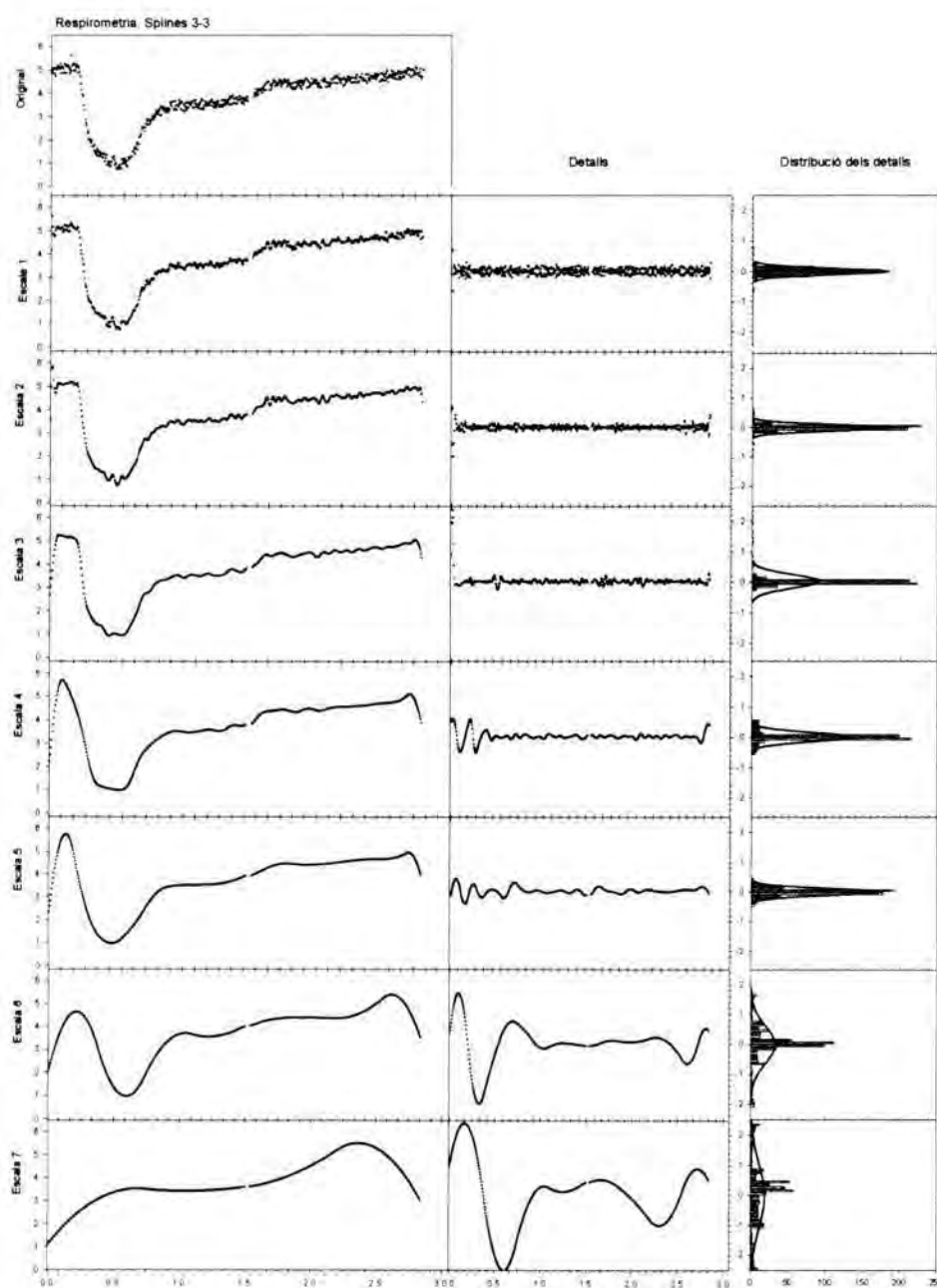


Figura 8.18. Anàlisi multiescalar d'una respirometria utilitzant splines 3:3

Senyal a escala 1. Comparant el senyal obtingut a escala 1, els splines 1:1 es mostren molt més eficaços que no els 3:3. Amb la utilització de les wavelets més grolleres, splines 1:1, el resultat obtingut en la primera escala aconsegueix eliminar el gruix que presentava el senyal original. Amb els splines 3:3, el senyal obtingut en la primera escala també redueix el gruix del traç, però en canvi presenta una oscil·lació local més important. Aquesta oscil·lació es pot observar amb els valors dels detalls de l'escala 1 que es mostren en la figura 8.19.

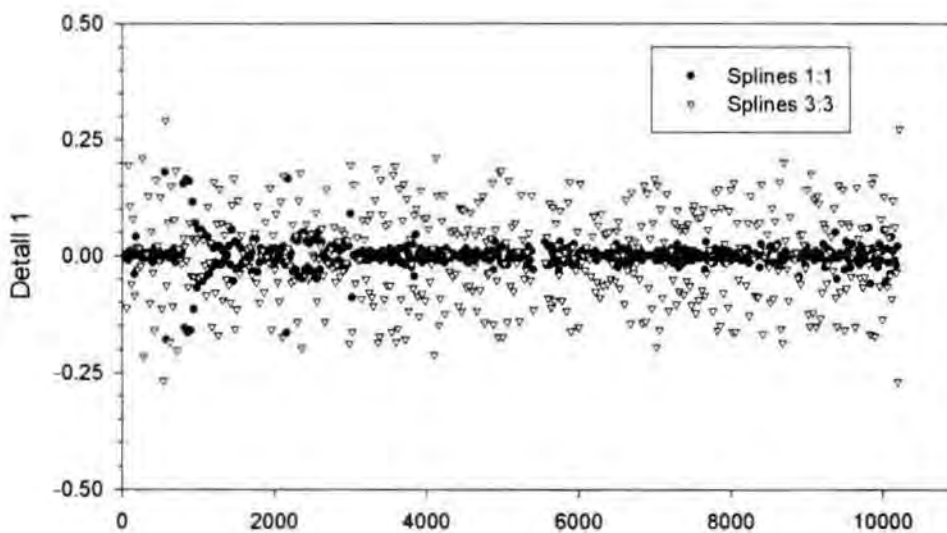


Figura 8.19. Comparació dels detalls a l'escala 1 amb splines 1:1 i 3:3.

En tant que els detalls obtinguts amb splines 1:1 es troben en la seva majoria dins l'interval $[-0.05, 0.05]$, els detalls dels splines prenen un interval de validesa de $[-0.20, 0.20]$.

Distorsió dels extrems. Un dels efectes que provoca anar avançant amb les escales, és l'aparició de la distorsió dels extrems del senyal. En l'anàlisi utilitzant splines 1:1, la distorsió del senyal no es comença a notar fins a l'escala 6, on el valor inicial de la concentració d'oxigen passa de 5.0 a 4.0 ppm. De fet, amb l'ús de wavelets que presenten un grau d'esmoreïment baix (com els splines 1:1) el que obtenim és una nova senyal que a mesura que avancem en les escales els valors prenen valors constants cada vegada més seguits, mostrant una aparença propera al d'esglaons o escales. L'efecte de distorsió del senyal amb les escales si

que nota amb els splines 3:3. A partir de l'escala 3 ja es comença a perdre el comportament constant del senyal que presenta en els instants inicials, fins arribar a l'escala 6 on es pot veure que la baixada inicial que experimenta el senyal s'ha transformat en una corba, perdent el comportament de baixada sobtada. Finalment a l'escala 7, el senyal obtingut presenta únicament la tendència global del senyal original, es a dir, un creixement positiu al llarg del temps. Excepte en el tram final on novament es mostra la distorsió final del senyal.

8.3.1.3 Eliminació de coeficients. Selecció automàtica de la base.

Tot i que es disposen de molt maneres de determinar la base de filtrat, en aquest exemple utilitzarem la funció de cost basada en l'entropia de Shannon i la recerca de la base a partir de l'algorisme creixent (growing). Com a wavelets utilitzarem les splines 1:1 i 3:3. La reconstrucció del senyal s'efectuarà modificant la transformada de wavelet segons l'expressió:

$$mwt_i = \begin{cases} 0 & \text{si } abs[wt_i] \leq Valor \\ wt_i & \text{si } abs[wt_i] > Valor \end{cases}$$

on: ***mwt***, transformada de wavelet modificada.

wt, transformada de wavelet.

Valor, criteri d'eliminació de coeficients.

Els esquemes de filtrats obtinguts a partir dels splines 1:1 i 3:3 es mostren en les figures 8.20 i 8.23 respectivament. La representació de la transformada de wavelet s'efectua sobre eixos semilogarítmics per tal de mostrar el valor dels primers coeficients que son els presenten una valor més elevat (figures 8.21 i 8.22).

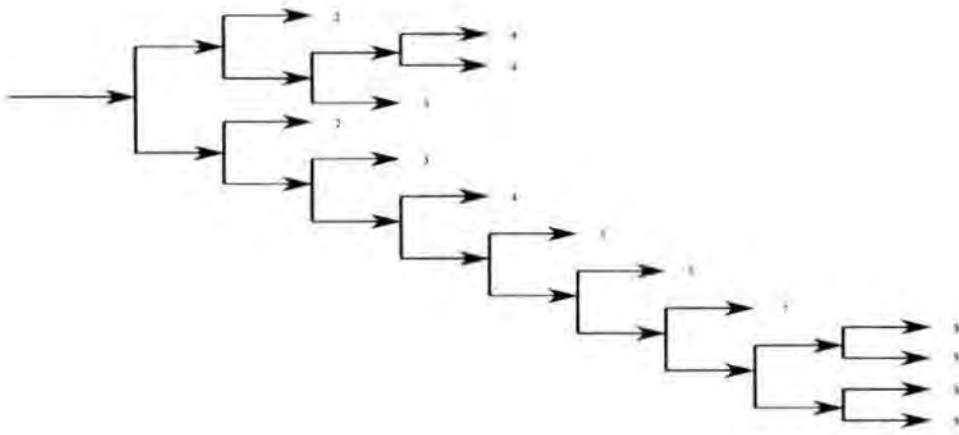


Figura 8.20. Base de filtrat obtinguda amb wavelets 1:1.
 [9,9,9,9,7,6,5,4,3,2,3,4,4,2]

Cadascuna de les bandes obtingudes s'ordena en forma de taula amb el nombre de coeficients que conté, el valor mig, el màxim i el mínim. En les taules 8.2 i 8.3 es mostren les bandes obtingudes amb splines 1:1 i 3:3 respectivament.

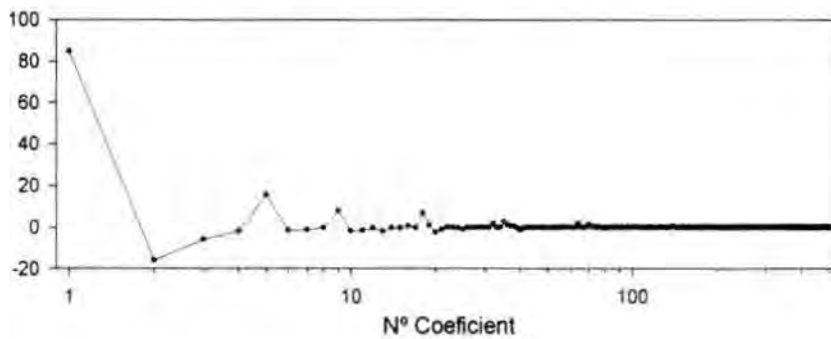


Figura 8.21. Transformada de wavelet amb splines 1:1.

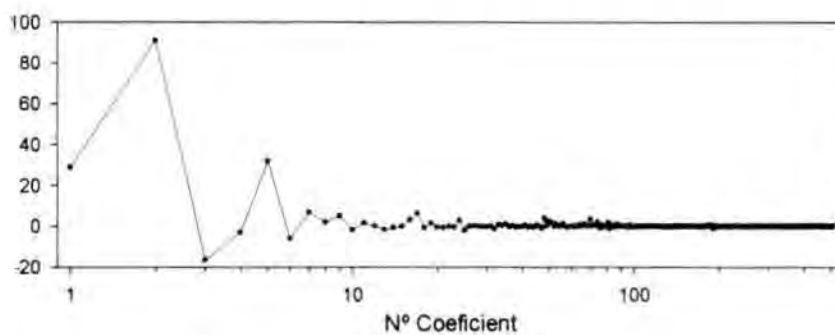


Figura 8.22. Transformada de wavelet amb splines 3:3.

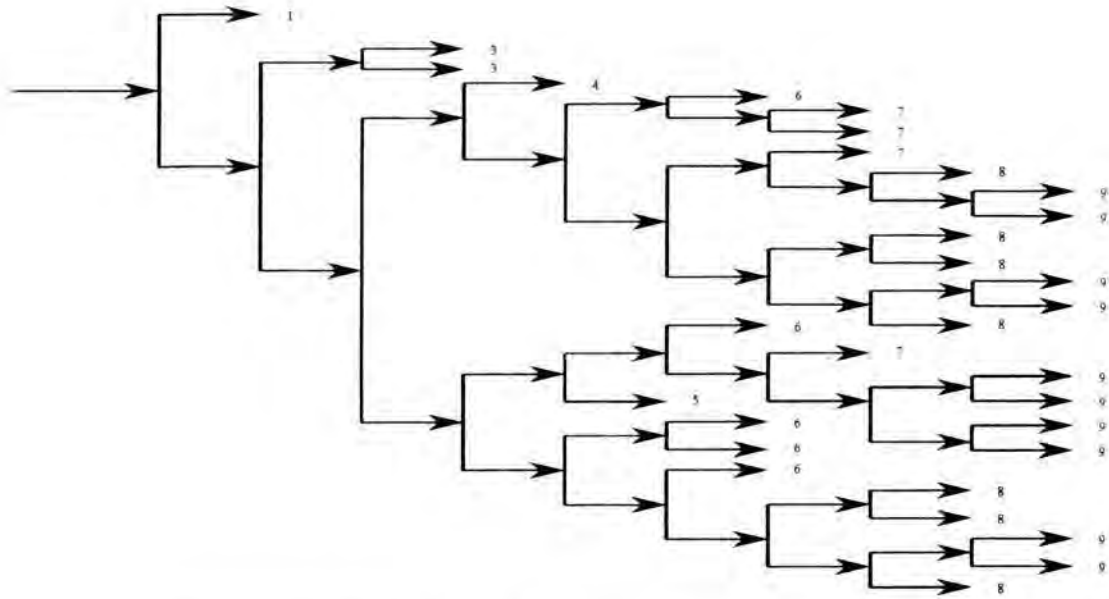


Figura 8.23. Base de filtrat obtinguda amb wavelets 3:3.
 [8,9,9,8,8,6,6,6,5,9,9,9,9,7,6,8,9,9,8,8,9,9,8,7,7,7,6,4,3,3,1]

Taula 8.2: Característiques de les bandes obtingudes amb wavelets 1:1.

| | | | | | | | | | |
|----------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Base | 9 | 9 | 9 | 9 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 |
| Nº Coef. | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 |
| Mitjana | 84.848 | -16.039 | -5.996 | -2.026 | 3.012 | 0.236 | 0.208 | 0.078 | 0.028 |
| Màxim | 84.848 | -16.039 | -5.996 | -2.026 | 15.522 | 8.000 | 6.9422 | 2.8460 | 1.411 |
| Minim | 84.848 | -16.039 | -5.996 | -2.026 | -1.763 | -1.988 | -2.456 | -1.3968 | -0.375 |

| | | | | | |
|----------|----------|--------|--------|---------|----------|
| Base | 2 | 3 | 4 | 4 | 2 |
| Nº Coef. | 128 | 64 | 32 | 32 | 128 |
| Mitjana | -6.30e-3 | -0.020 | 0.0279 | 3.24e-3 | -4.75e-3 |
| Màxim | 0.587 | 0.276 | 0.288 | 0.203 | 0.430 |
| Minim | -0.345 | -0.317 | -0.293 | -0.252 | -0.367 |

Taula 8.3: Característiques de les bandes obtingudes amb wavelets 3:3.

| | | | | | | | | | |
|----------|--------|---------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
| Base | 8 | 9 | 9 | 8 | 8 | 6 | 6 | 6 | 5 |
| Nº Coef. | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 8 | 8 | 8 | 16 |
| Mitjana | 59.997 | -16.658 | -3.024 | 12.857 | 4.410 | 0.701 | 0.995 | -0.500 | 0.300 |

Taula 8.3: Característiques de les bandes obtingudes amb wavelets 3:3.

| | | | | | | | | | |
|----------|--------|---------|--------|---------|--------|----------|-----------|--------|--------|
| Màxim | 91.173 | -16.658 | -3.024 | 31.9073 | 6.823 | 4.988 | 6.286 | 0.136 | 4.087 |
| Mínim | 28.820 | -16.658 | -3.024 | -6.1932 | 1.997 | -1.795 | -0.878 | -2.078 | -1.197 |
| Base | 9 | 9 | 9 | 9 | 7 | 6 | 8 | 9 | 9 |
| Nº Coef. | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 8 | 2 | 1 | 1 |
| Mitjana | 0.050 | 2.526 | 1.733 | -0.064 | 0.694 | -8.78e-3 | 0.407 | 1.187 | 0.148 |
| Màxim | 0.050 | 2.526 | 1.733 | -0.064 | 1.4829 | 0.8846 | 0.815 | 1.187 | 0.148 |
| Mínim | 0.050 | 2.526 | 1.733 | -0.064 | 0.0345 | -0.4577 | -1.326e-3 | 1.187 | 0.148 |
| Base | 8 | 8 | 9 | 9 | 8 | 7 | 7 | 7 | 6 |
| Nº Coef. | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 4 | 4 | 4 | 8 |
| Mitjana | 1.748 | 0.119 | 0.296 | 2.188 | -0.419 | 0.141 | 0.361 | 0.207 | 0.034 |
| Màxim | 3.468 | 0.289 | 0.296 | 2.188 | 0.052 | 0.689 | 1.843 | 1.110 | 0.588 |
| Mínim | 0.028 | -0.051 | 0.296 | 2.188 | -0.890 | -0.269 | -1.190 | -0.202 | -0.404 |
| Base | 4 | 3 | 3 | 1 | | | | | |
| Nº Coef. | 32 | 64 | 64 | 256 | | | | | |
| Mitjana | 0.012 | -0.018 | -0.022 | -0.011 | | | | | |
| Màxim | 0.554 | 0.592 | 0.223 | 0.230 | | | | | |
| Mínim | -0.332 | -1.313 | -0.363 | -0.312 | | | | | |

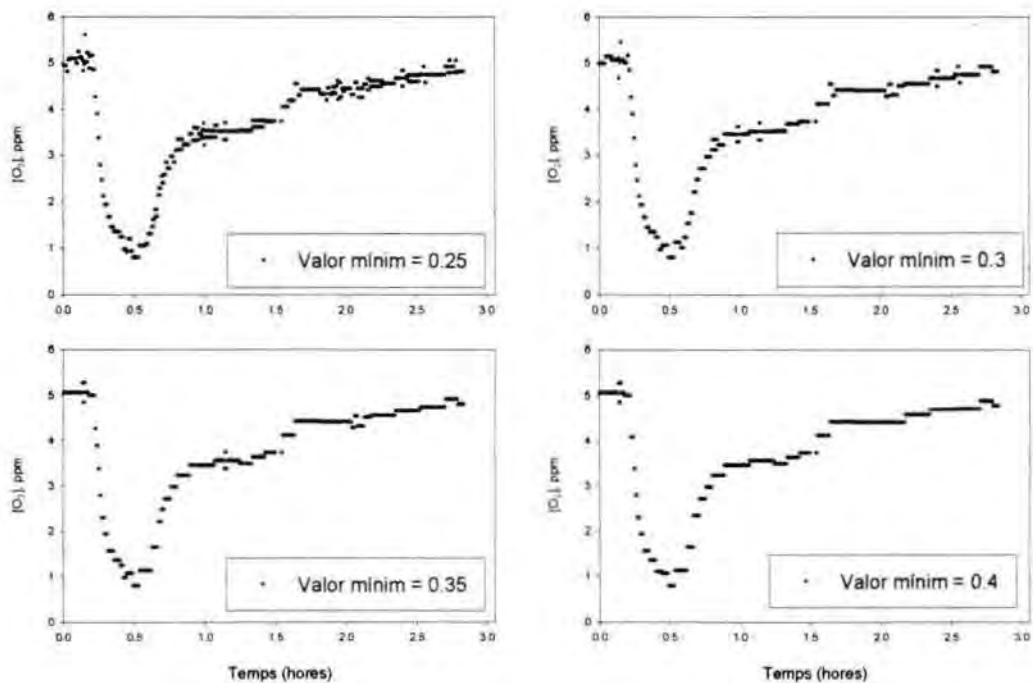


Figura 8.24. Reconstrucció del senyal segons el criteri de valor mínim (splines 1:1).

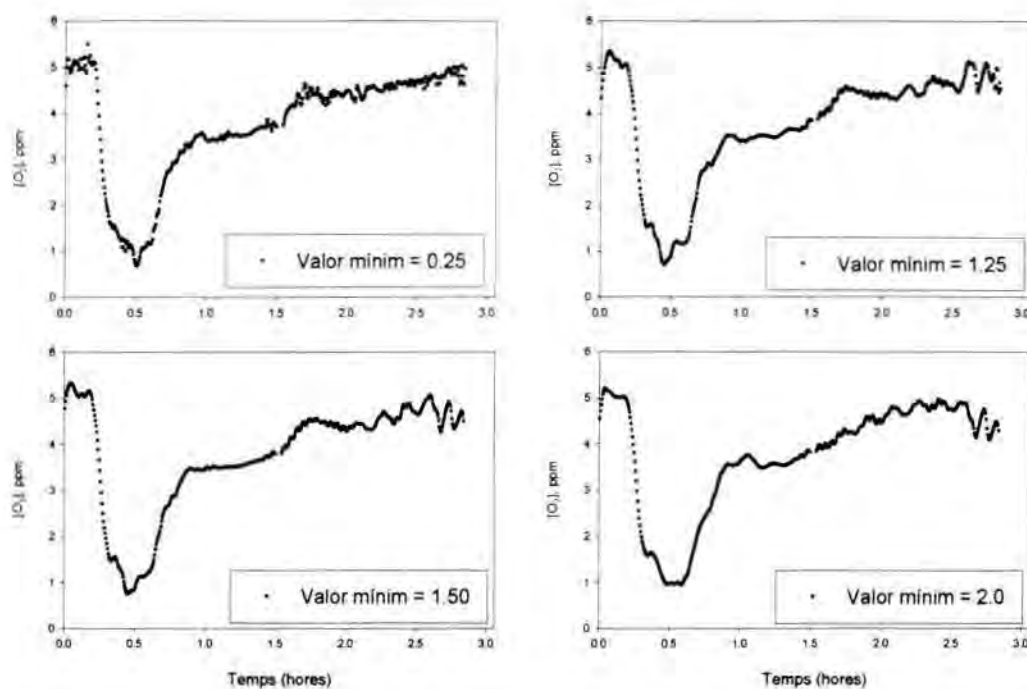


Figura 8.25. Reconstrucció del senyal segons el criteri de valor mínim (splines 3:3).

8.3.1.4 Comparació de metodologies.

Per a cada metodologia utilitzada, hem obtingut una sèrie de possibles reconstruccions del senyal original de la que escollirem les següents per tal de comparar-les.

| | |
|---|-------------------------------------|
| Anàlisi multiescalar amb Splines 1:1 | Senyal a l'escala 1 |
| Anàlisi multiescalar amb Splines 3:3 | Senyal a l'escala 3 |
| Eliminació de coeficients amb Splines 1:1 | Valor mínim de 0.4 (31 coeficients) |
| Eliminació de coeficients amb Splines 3:3 | Valor mínim de 2.0 (16 coeficients) |

Si tenim en compte que el valor del primer pendent trobat a través de la regressió lineal era de -0.0134, la reconstrucció del senyal amb una escala de 3 i utilitzant splines 3:3 és la que ens dona un valor més semblant (-0.0131). La segona correspondria a l'eliminació de coeficients amb un valor inferior a 0.4 i utilitzant

també els splines 3:3 (pendent de -0.0129). Finalment tindrem les reconstruccions amb Splines 1:1 tal i com es pot veure en la figura 8.26.

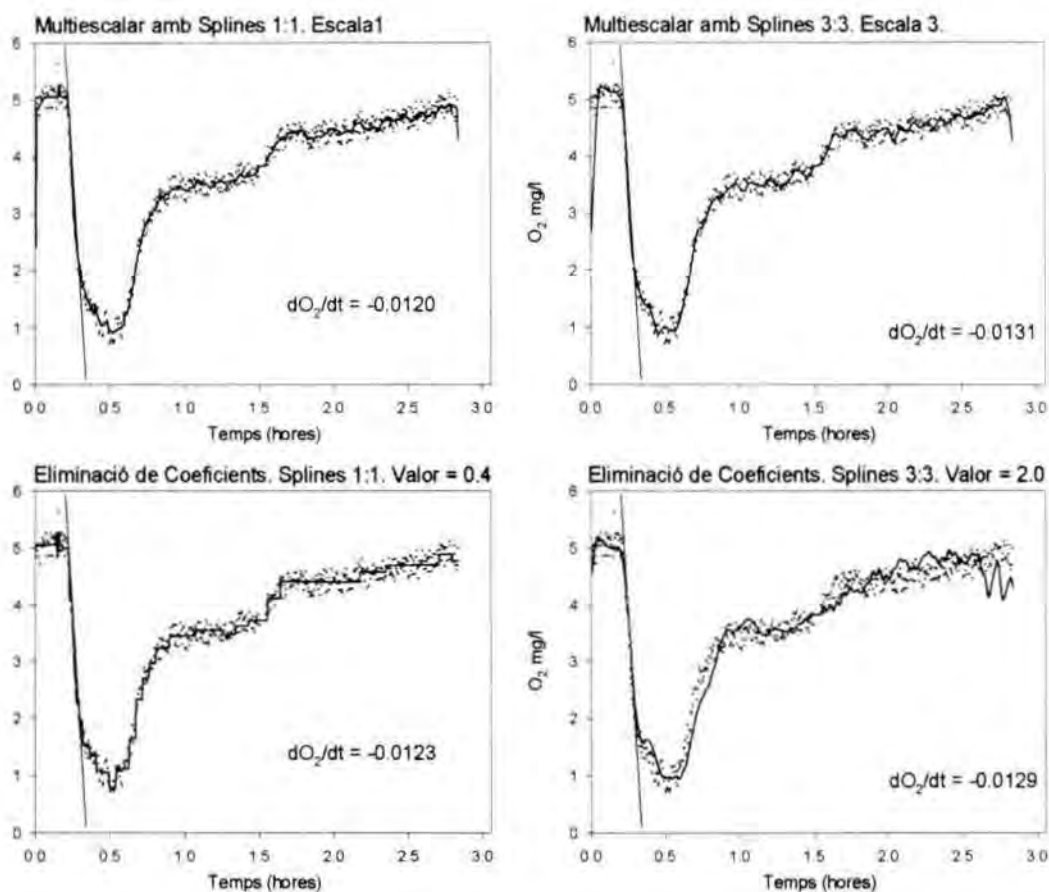


Figura 8.26. Comparació de les metodologies en la reconstrucció del senyal original.

8.3.2 Aplicació de les wavelets a les dades obtingudes en línia en la depuradora d'aigües residuals de Tarragona.

Un dels passos a seguir en la modelització - simulació d'una edar és la calibració dels paràmetres del model a partir de les dades reals disponibles. Moltes variables es coneixen a partir de procediments analítics de laboratori. En l'actualitat, es possible disposar del valor d'algunes de les variables del model en continu. En el cas de la depuradora de Tarragona, es disposa d'un sistema d'adquisició de dades que permet obtenir valors d'algunes de les variables amb una freqüència de 1 minut. Concretament en aquest cas ens centrarem en els cabals d'entrada a la planta (cabal d'aigua bruta), el cabal de tractament biològic (cabal biològic), la

concentració d'oxigen dissolt en el reactor biològic i el consum d'aire en els reactors biològics.

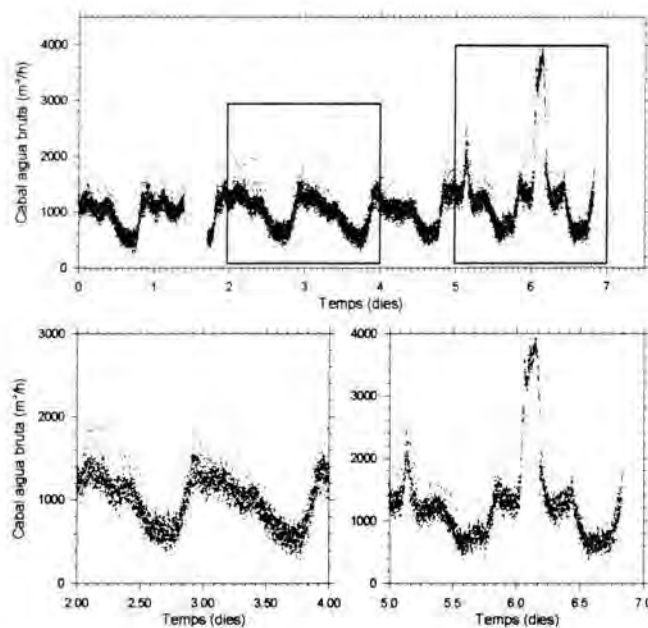


Figura 8.27. Cabal d'aigua bruta a l'entrada de la edar.

L'objectiu del filtrat serà l'obtenció d'un perfil diari suavitzat per als cabals d'entrada i de tractament biològic així com dels consums d'aire.

8.3.2.1 Característiques de les dades

A partir del sistema d'adquisició de dades de la depuradora, es varen obtenir els perfils de cadascuna de les variables estudiades de 7 dies consecutius. Durant el període escollir hi va haver una aturada del sistema d'adquisició de dades de 7 hores que tingué lloc entre els dies 1 i 2 de la seqüència. L'observació visual del perfil de cabal d'aigua bruta mostra un perfil diari que es va repetint de forma més o menys constant durant els 5 primers dies. Els darrers dos dies, es pot observar la presència de d'una punta de cabal que correspondria a l'aparició de tempestes. Per tal de facilitar la visualització de l'ajust de les dades, es mostren els períodes corresponents als dies 2-4 i 5-7 (figura 8.27). el nombre punts disponibles per a cadascuna de les variables és de 9376.

Cabal d'aigua bruta. És el cabal total que arriba a l'estació depuradora i que es tractat només en el procés primari.

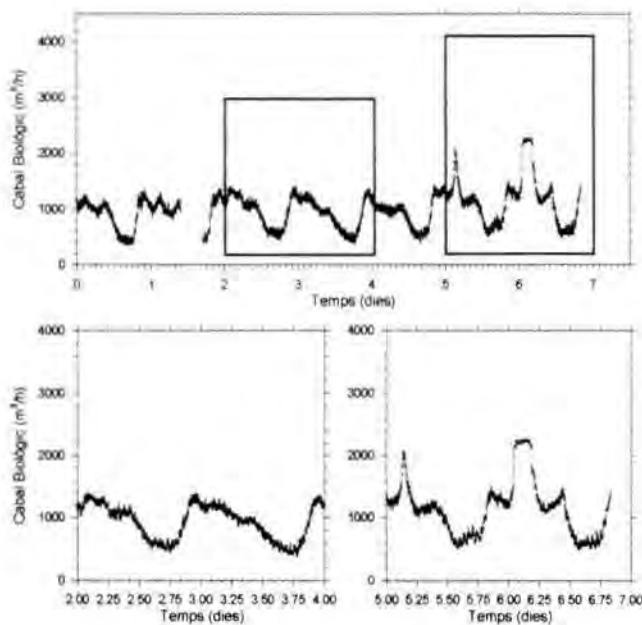


Figura 8.28. Cabal d'aigua a l'entrada del biològic.

Cabal biològic. Després de la decantació primària, un sistema de by-pass limita el cabal d'entrada al reactor biològic a un màxim de 2200 m³/hora . El cabal biològic presenta un oscil·lació menor que el cabal d'aigua bruta, degut en part a l'efecte d'homogenització que provoquen els sistemes de tractament primaris.

Oxigen dissolt. Les dues línies paral·leles de tractament biològic de la edar de Tarragona treballen de la mateixa forma. Així, cadascun dels reactors biològics disposa de dues zones: una primera fracció del volum sense aport d'aire, i una segona airejada. Es disposen de 4 sondes d'oxigen, dues per a cada línia disposades al principi i al final de la zona airejada. EL sistema de control de la planta efectua una lectura de la concentració d'oxigen per a cadascuna de les sondes, en calcula un valor mig i actua sobre el cabal d'aire.

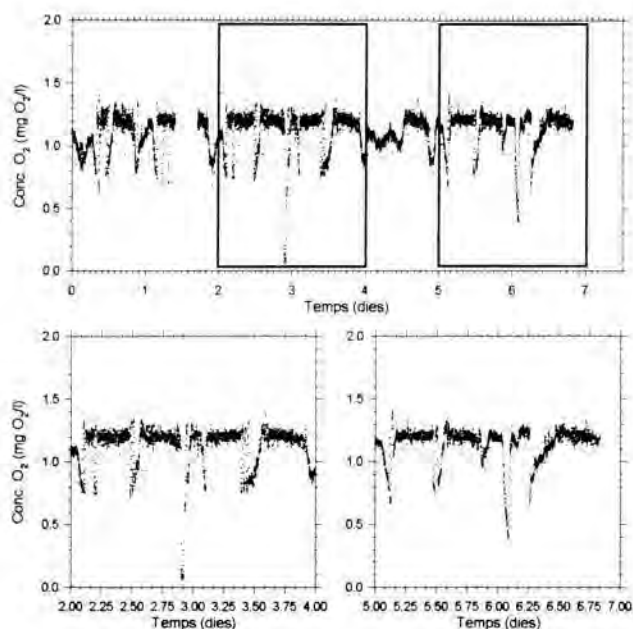


Figura 8.29. Valor mig de la concentració d'oxigen.

Cabal d'aire. Per a cadascun dels reactors biològics es disposa del cabal d'aire subministrat en m^3/h . Com que existeix un sistema de control que ajusta la concentració d'oxigen dissolt en les bases, les variables que presentaran una oscil·lació deguda a la càrrega d'entrada seran els cabal d'aire subministrats.

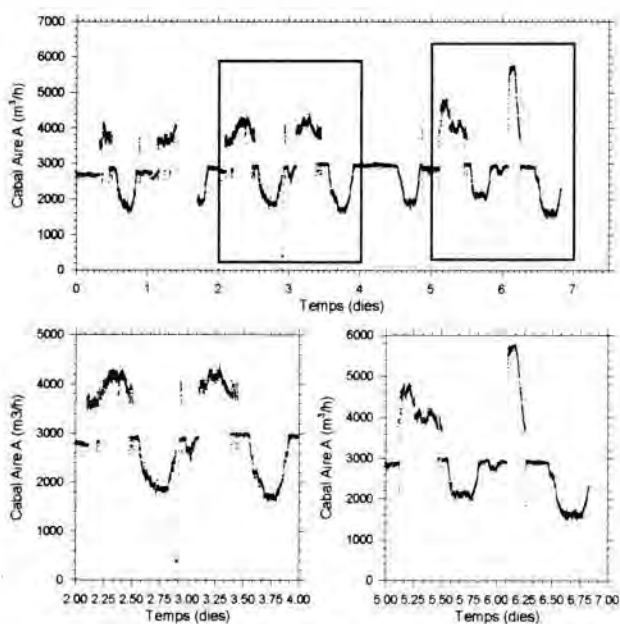


Figura 8.30. Cabal d'aire aportat al reactor biològic A.

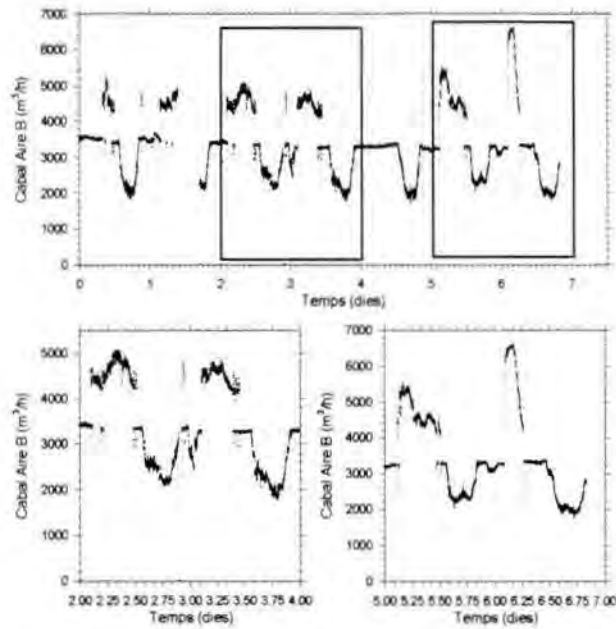


Figura 8.31. Cabal d'aire aportat al reactor biològic B.

8.3.2.2 Anàlisi multiescalar.

A continuació es mostren els anàlisis multiescalars per a cadascuna de les variables utilitzant wavelets splines 3:3. En la Taula 8.4 es mostren les escales obtingudes en cada anàlisi que donen un perfil més adequat per a la seva utilització posterior en la calibració.

Taula 8.4 Selecció de les escales millors per a cadascuna de les variables

| Variable | Dies 2-4 | Dies 5-7 |
|------------------------|----------|----------|
| Cabal d'aigua bruta | 6 | 5 |
| Cabal d'aigua biològic | 6 | 5 |
| Oxigen dissolt mig | 4 | 4 |
| Cabal d'aire A | 4 | 4 |
| Cabal d'aire B | 4 | 4 |

Cabal d'aigua bruta i biològic.

El procés de selecció de les millors escales es subjectiu donat que l'elecció es fa a partir de les observacions entre les dades originals i les filtrades. Així, l'escala selecciona per a una mateixa variable pot variar en funció del rang escollit. Per al cabal d'aigua bruta i biològic (figures 8.32, 8.33, 8.34 i 8.35), es pot veure com degut a la presència d'una pertorbació en el cabal d'entrada del tipus impuls que té lloc entre els dies 5 i 7 (figures 8.33 i 8.35) evita l'elecció d'una escala més elevada. En tant que en el perfil d'un dia normal (figures 8.32 i 8.34) es pot arribar a escollir una escala de fins a 6, la presència d'un increment sobtat del cabal d'entrada fa que s'hagi d'escollir una escala inferior, escala 5. L'elecció de l'escala 5 en els diagrames multiescalar del cabal d'entrada i biològic permet mantenir perfectament el perfil del cabal d'entrada, doncs a l'escala de 6 el pic provocat per l'augment sobtat de cabal es pot confondre amb un comportament sinusoidal del senyal.

Oxigen dissolt.

L'anàlisi multiescalar de l'oxigen dissolt (figures 8.36 i 8.37) ve marcat en part per les escales 4 i 5. La presència d'una baixa important en la concentració d'oxigen als 2 dies i 20 hores de fins a 0.05 mg O₂/l ens limita l'ús d'escales superiors; així fins a l'escala 4 es manté la baixa important i a partir de l'escala 5 es veu reduïda dins a un mínim de 0.24 mg O₂/l. El mateix succeeix entre els dies 5 i 7 (6 dies 1 hora) on la concentració inicial baixa fins als 0.39 mg O₂/l inicialment i a l'escala 5 el mínim assolit és de 0.47 mg O₂/l.

Cabal d'aire.

El cabal d'aire subministrat a cadascun dels reactors biològics A i B també presenta baixades importants en l'aportació d'aire. Aquesta disminució de la concentració d'oxigen dissolt i d'aire aportant es deguda a l'aturada que va sofrir la planta per manca de corrent elèctric. Novament en aquest cas l'escala escollida ha estat la 4 per tal de donar a el senyal la importància adequada a la manca de subministrament elèctric. En les figures 8.39 i 8.41, on es mostra el cabal d'aire durant els dies 5 i 7, l'elecció de l'escala 4 es fa per tal de mantenir el comportament no lineal de la baixada de consum d'aire que té lloc després de l'augment (6 dies 5 hores). En l'escala 4 s'observa com la disminució del consum d'aire es produeix seguint dues rectes de pendents diferents, en tant que en l'escala

5 es pot ajustar a una única recta. A escales superiors, el senyal es pot arribar a confondre amb un comportament sinusoidal.

La comparació entres les dades originals i les escales seleccionades per a totes les variables es mostra en la figura 8.42.

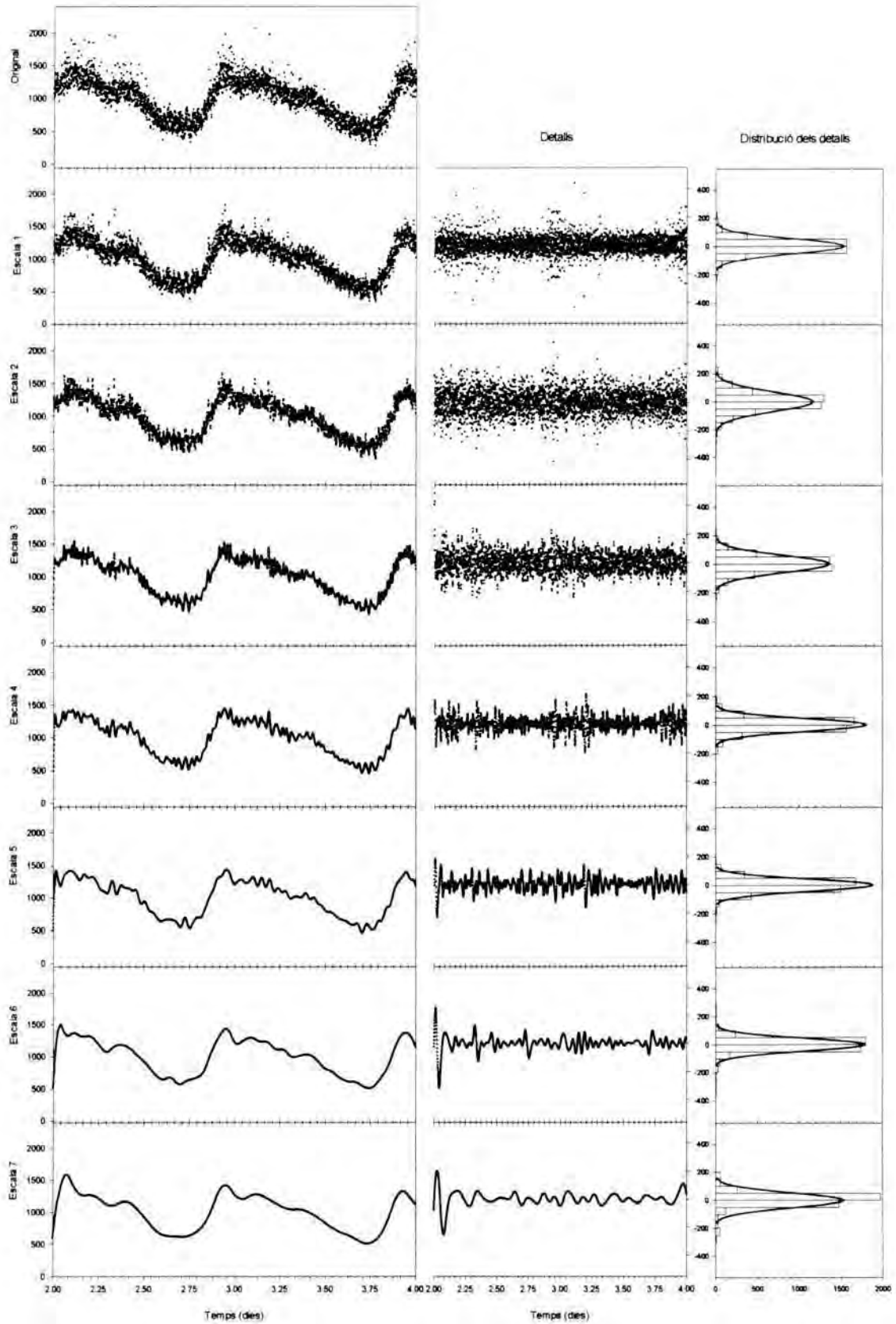


Figura 8.32. Anàlisi multiescalar del cabal d'aigua bruta. Dies 2-4.

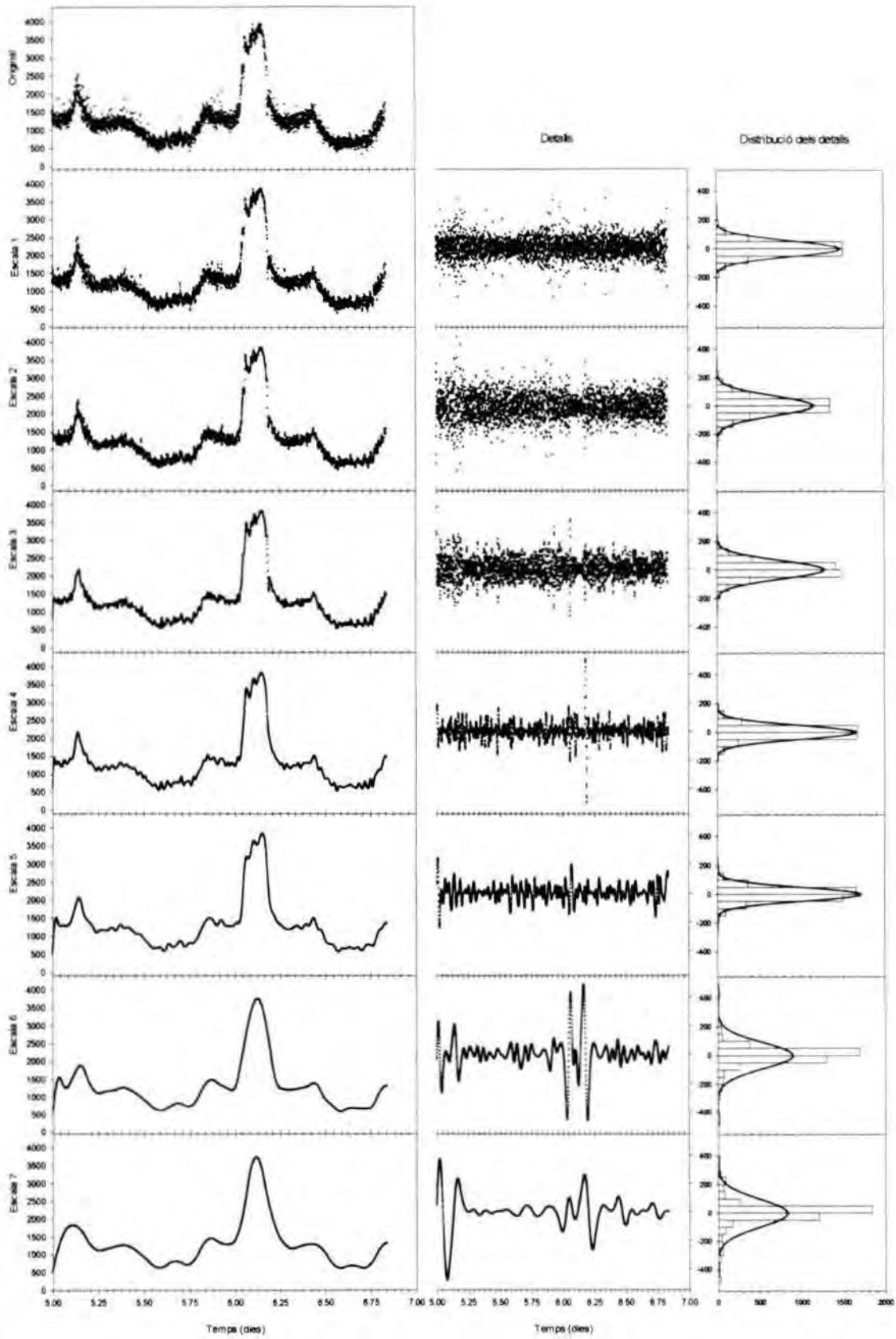


Figura 8.33. Anàlisi multiescalar del cabal d'aigua bruta. Dies 5-7

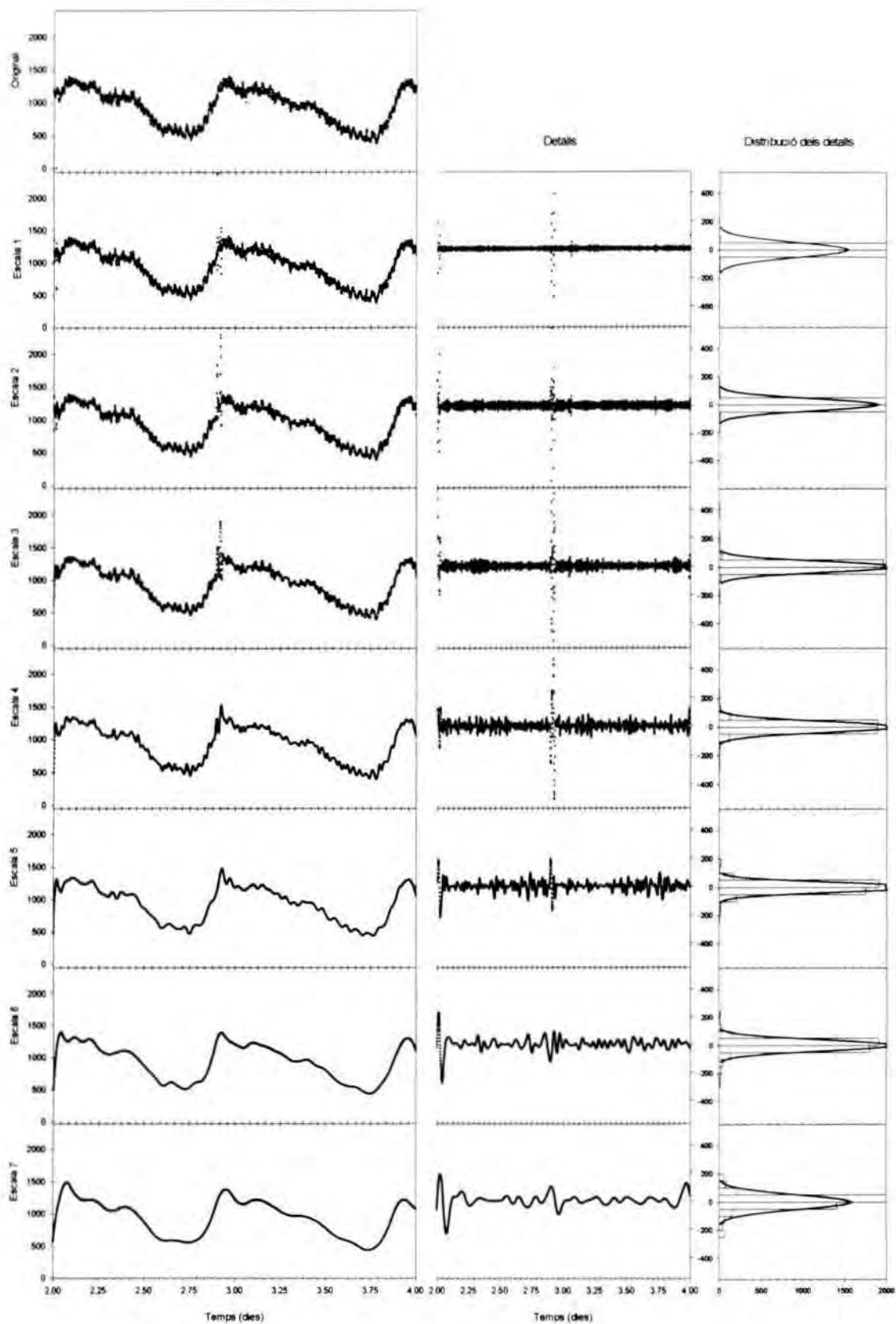


Figura 8.34. Anàlisi multiescalar del cabal d'aigua biològic. Dies 2-4

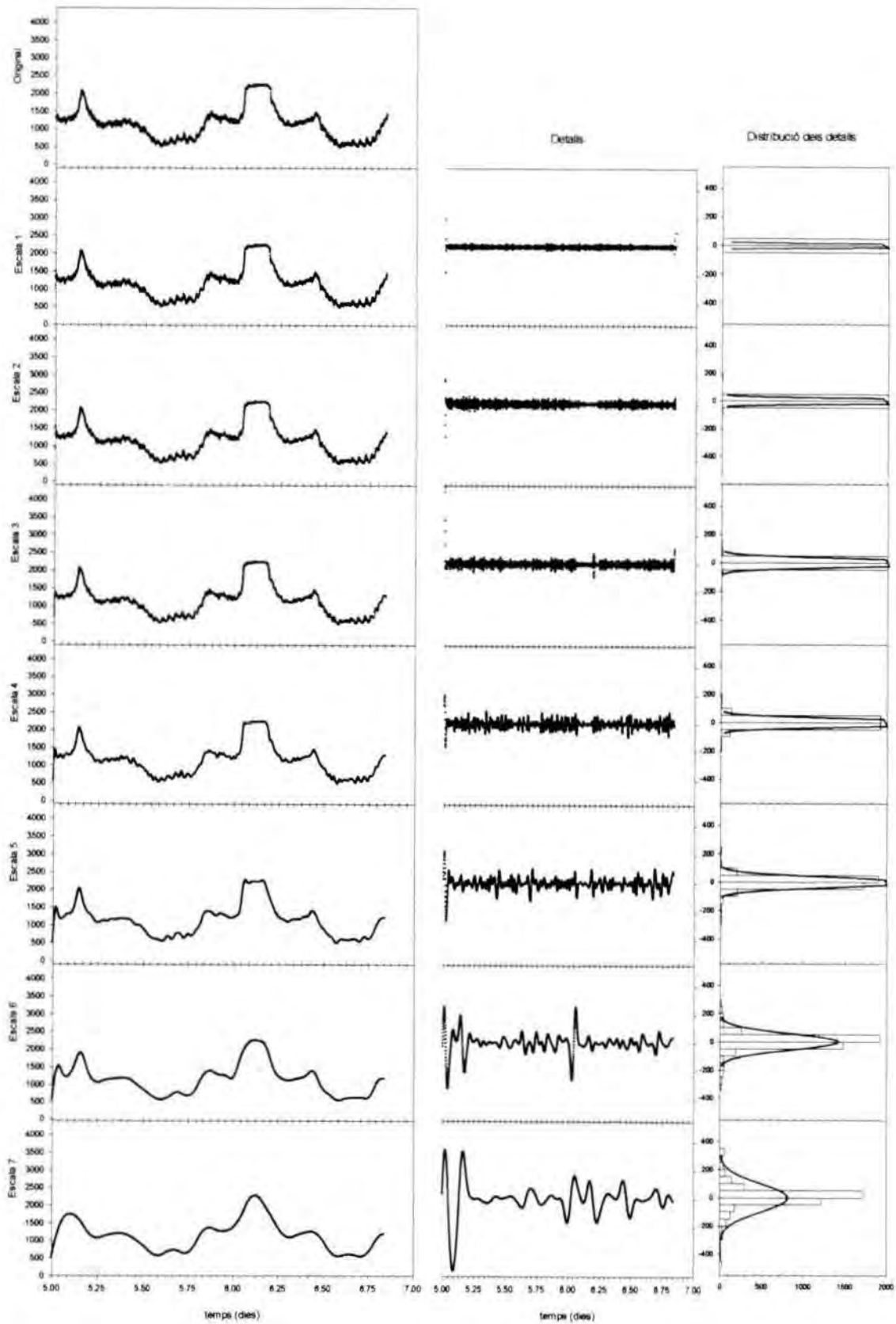


Figura 8.35. Anàlisi multiescalar del cabal d'aigua biològic. Dies 5-7.

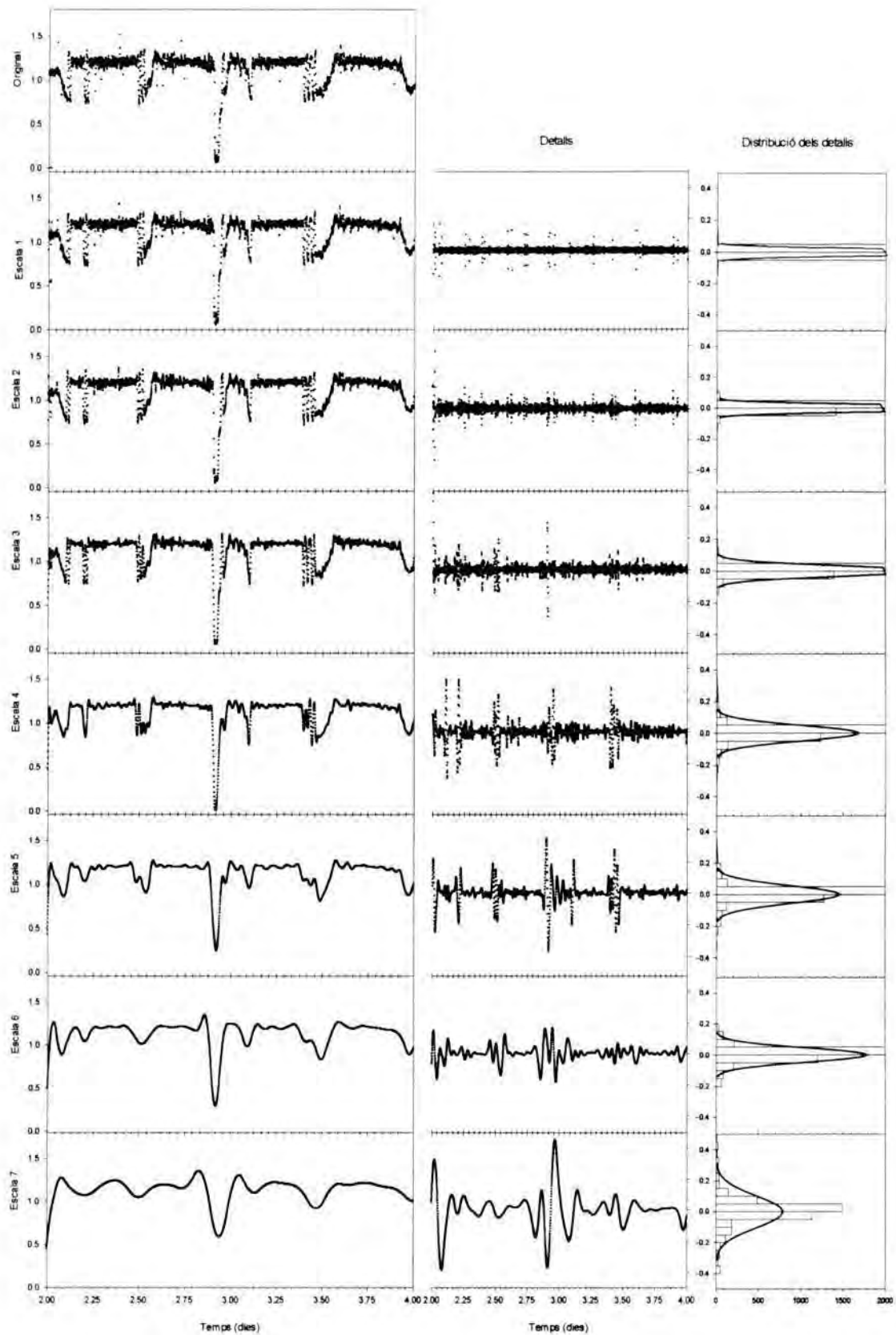


Figura 8.36. Anàlisi multiescalar oxigen mig. Dies 2-4.

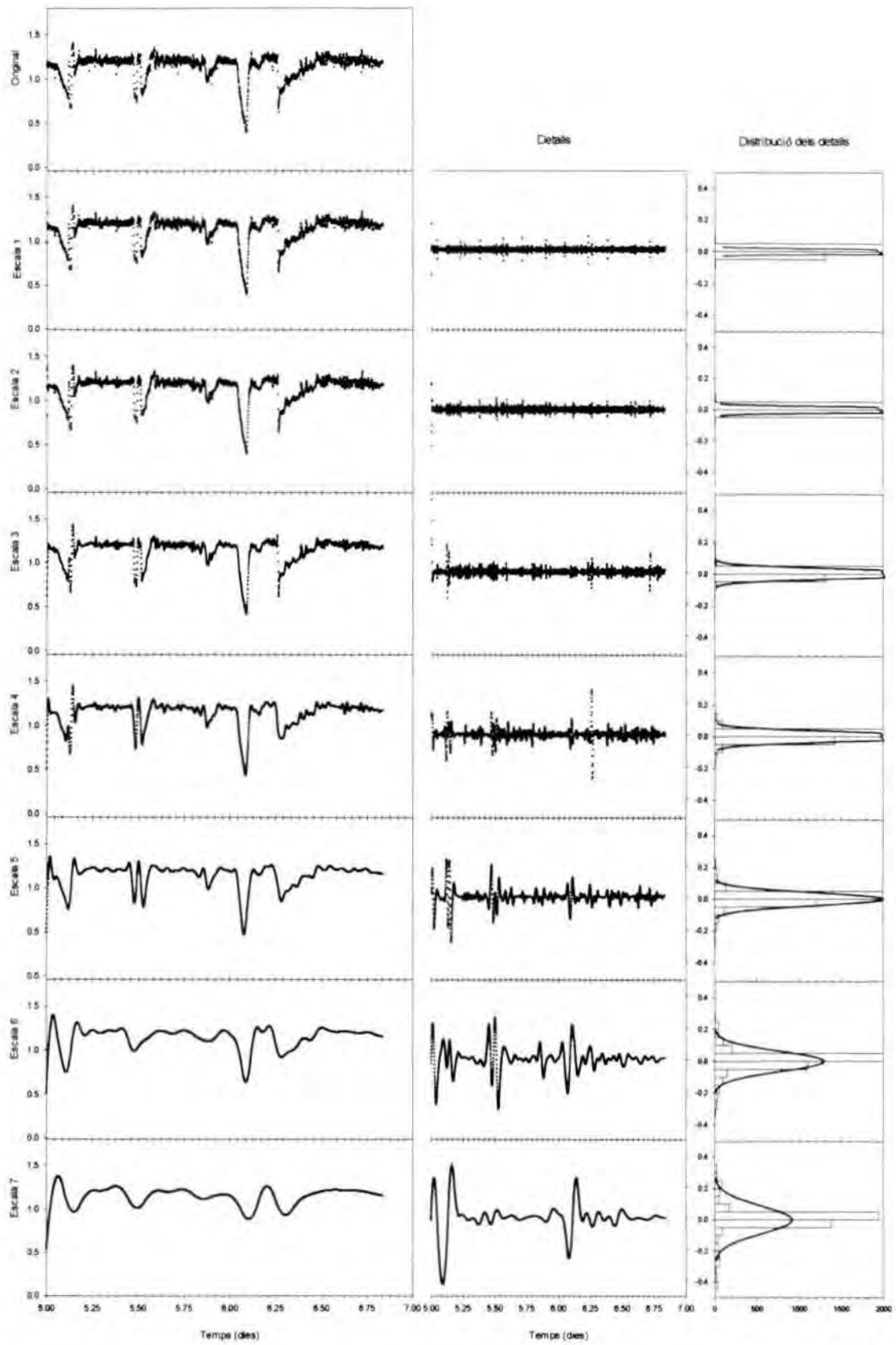


Figura 8.37. Anàlisi multiescalar oxigen mig. Dies 5-7.

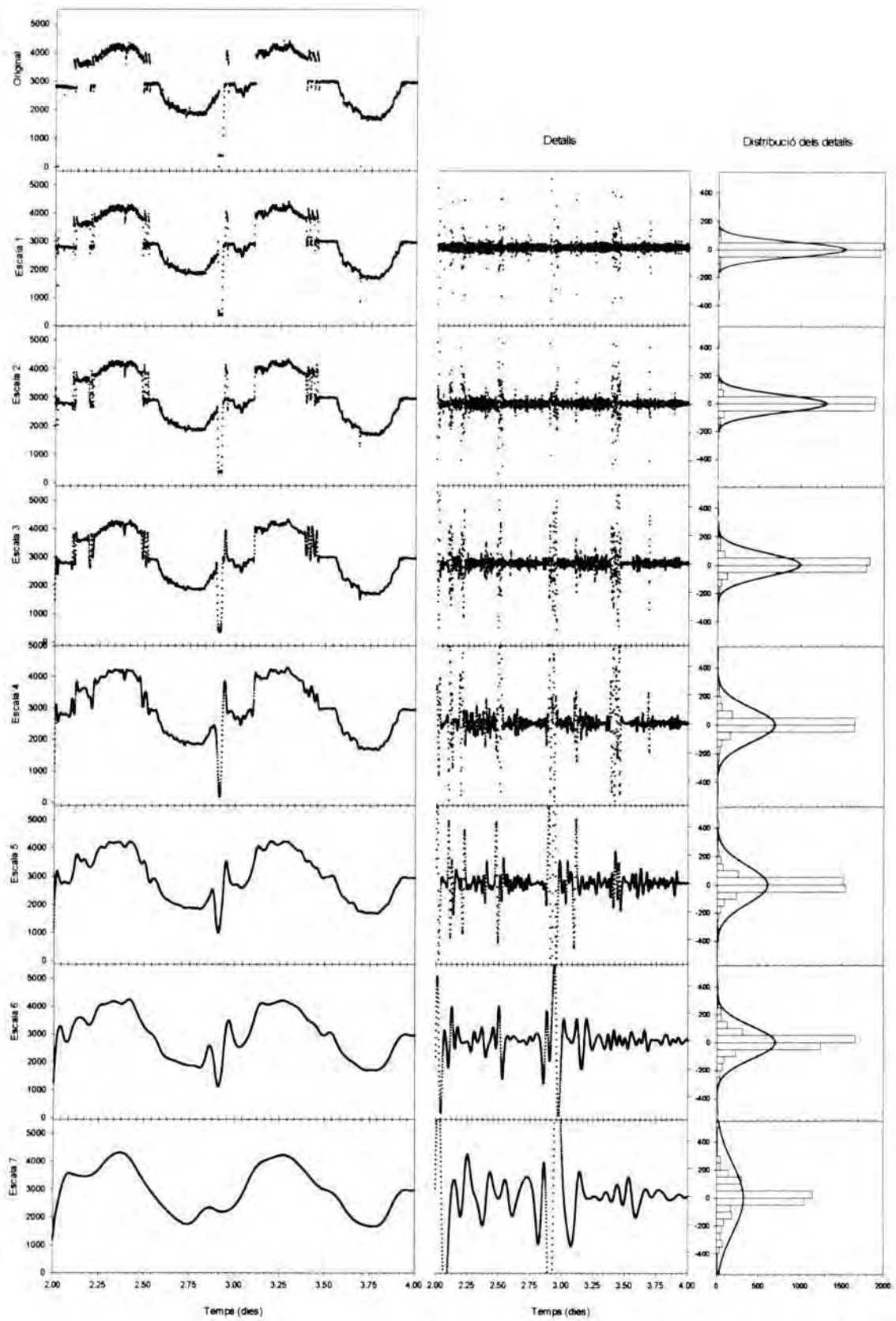


Figura 8.38. Anàlisi multiescalar cabal d'aire reactor A. Dies 2-4.

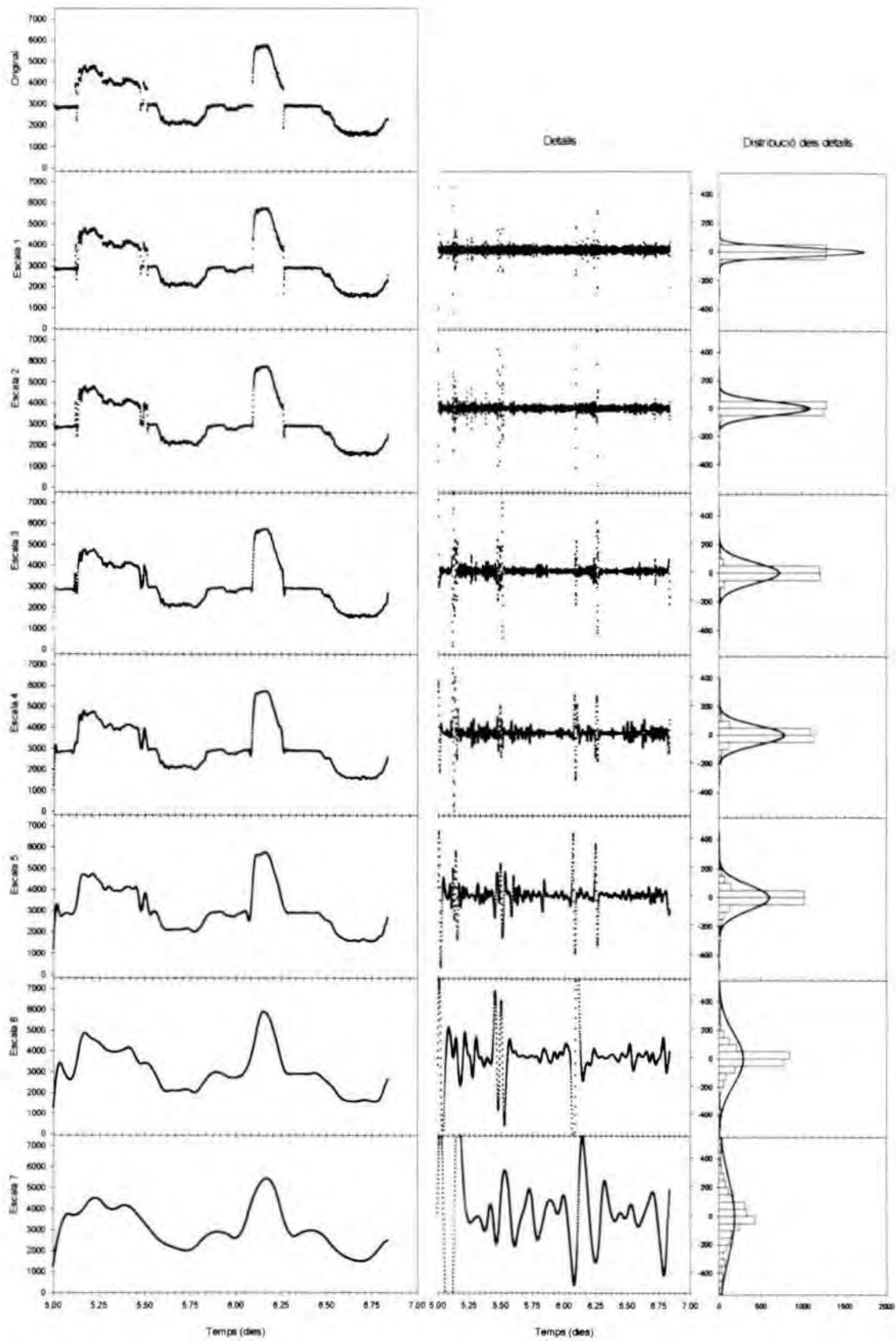


Figura 8.39. Anàlisi multiescalar cabal d'aire reactor A. Dies 5-7.

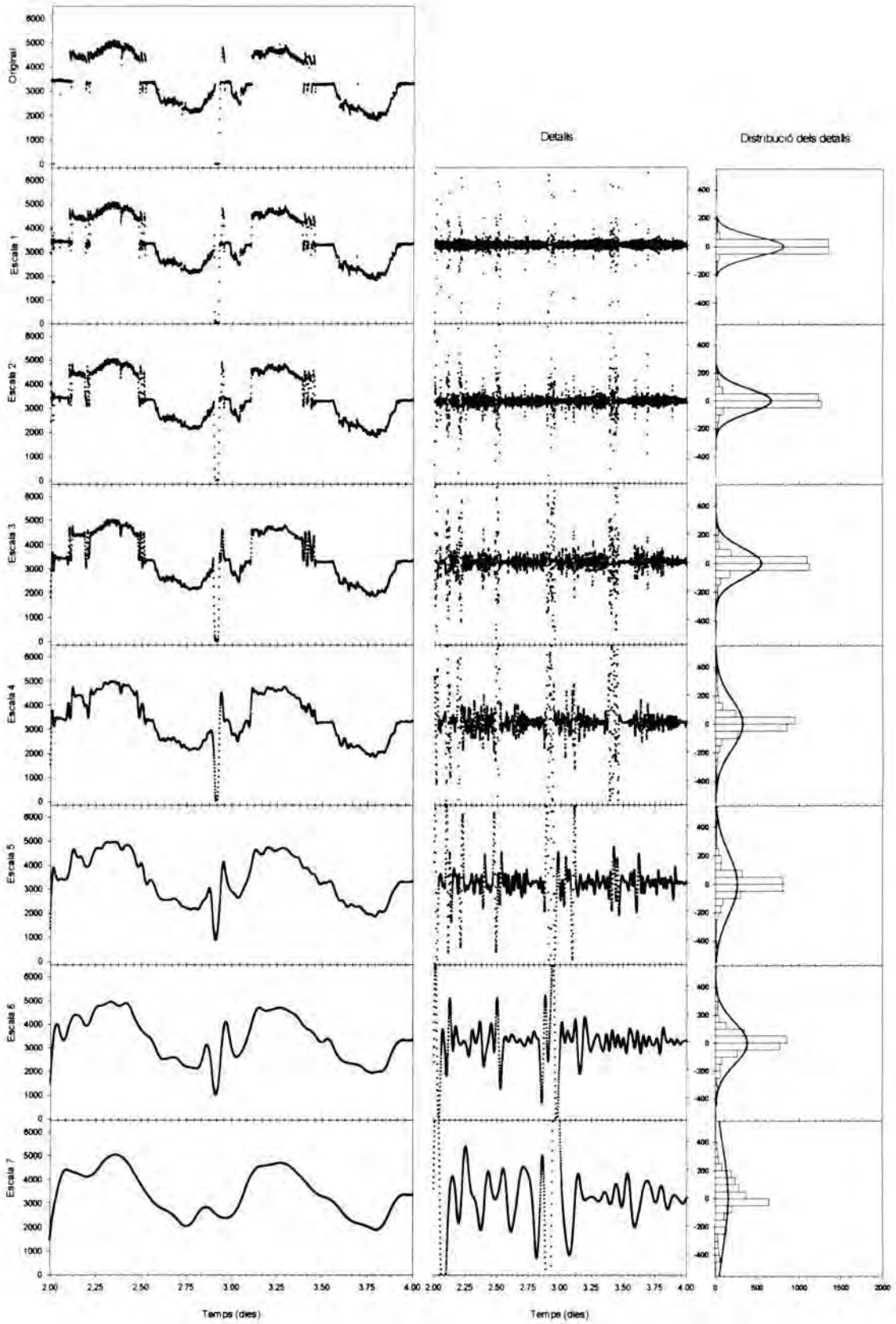


Figura 8.40. Anàlisi multiescalar cabal d'aire reactor B. Dies 2-4.

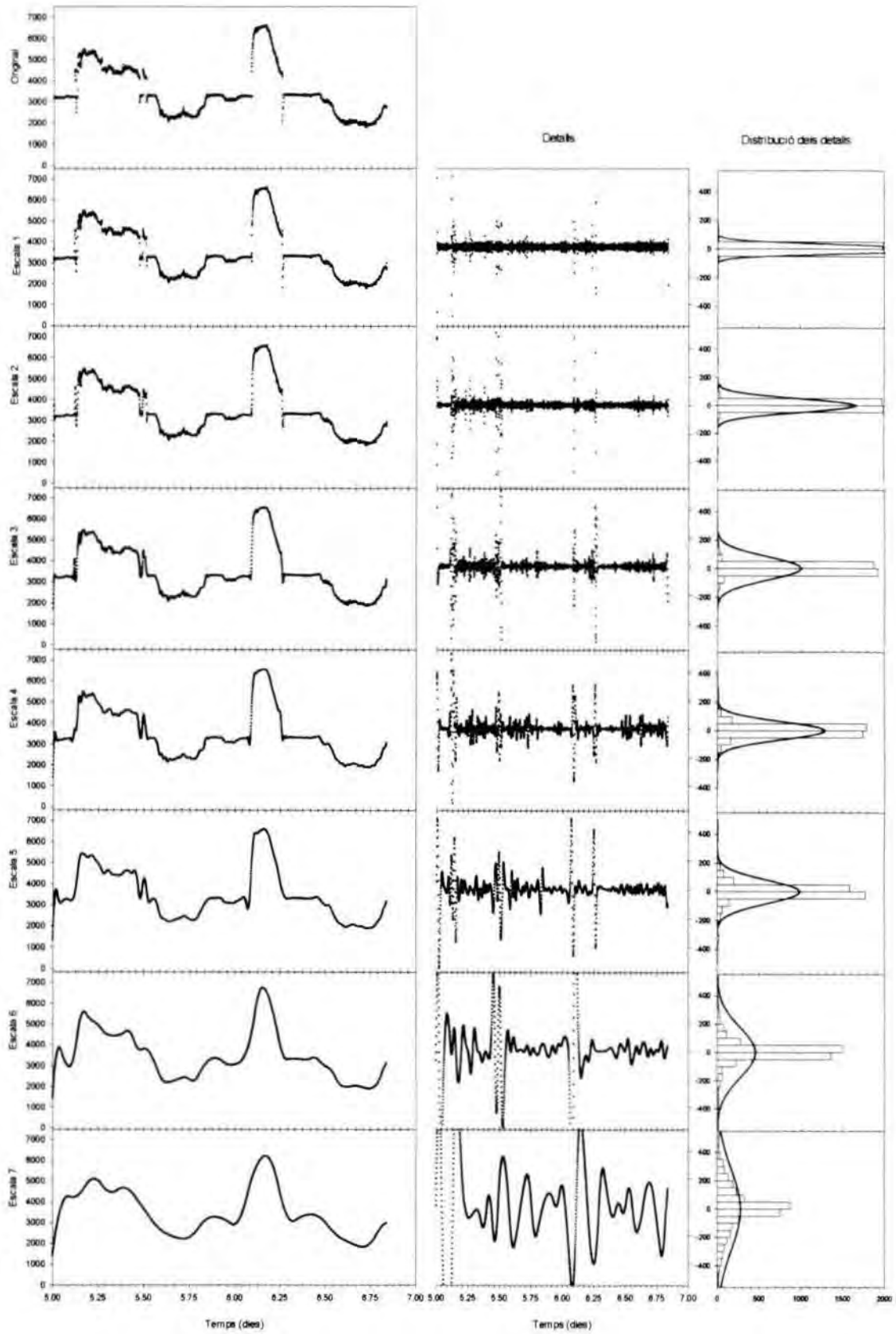


Figura 8.41. Anàlisi multiescalar cabal d'aire reactor B. Dies 5-7.

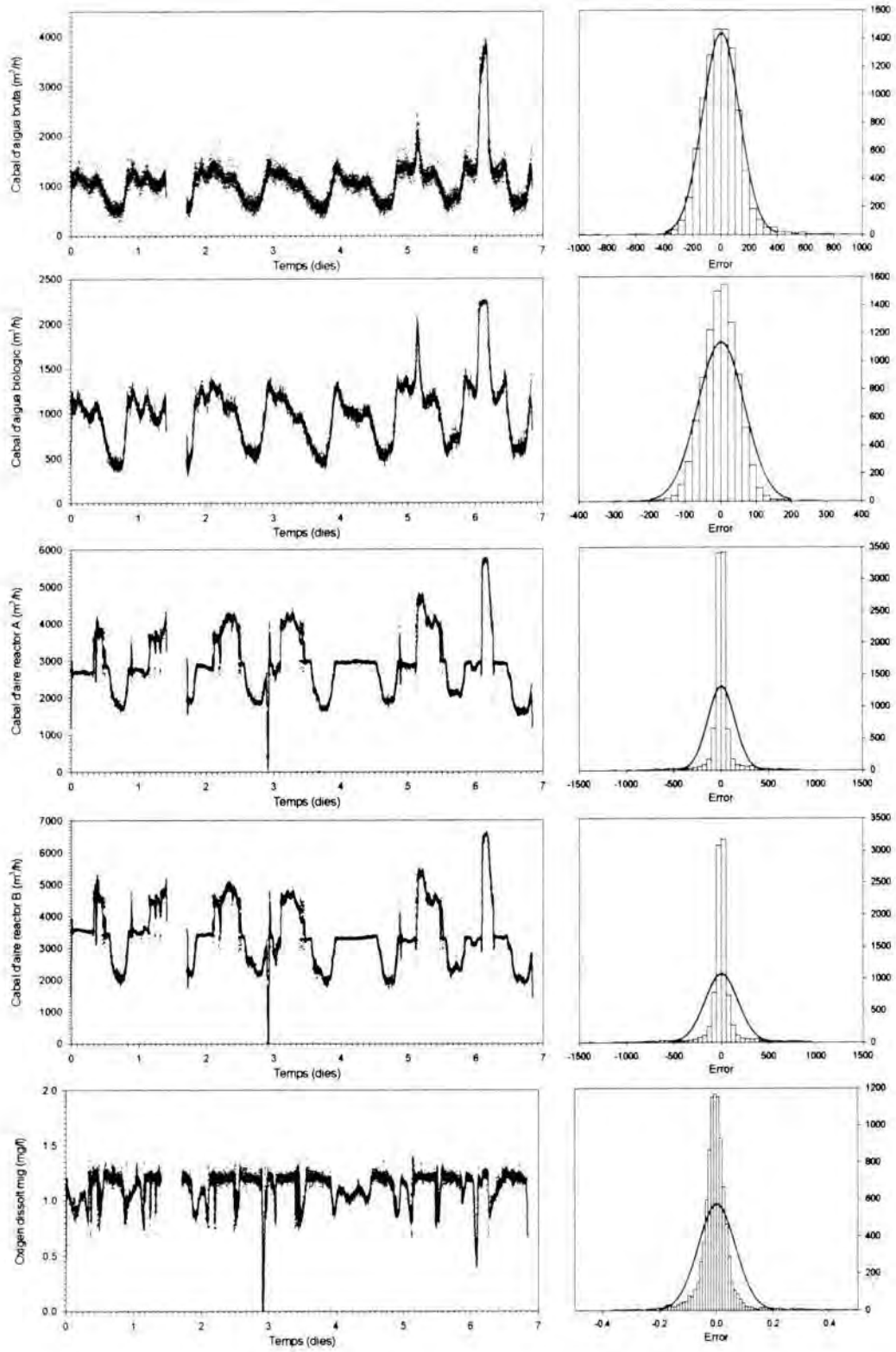


Figura 8.42. Comparació dades originals i filtrades.

CONCLUSIONS

9. CONCLUSIONS.

- De la revisió dels models desenvolupats e implementats en diferents softwares per descriure el comportament de les EDAR es conclou que existeixen un conjunt de models dinàmics que inclouen la major part dels processos actualment coneguts implicats en el tractament biològic de les aigües residuals urbanes.
- La consideració d'aquests processos implica la existència d'un nombre elevat de paràmetres que requereixen un ampli conjunt de dades per a la seva calibració.
- Les dades disponibles a les EDAR actualment en funcionament varien en la seva freqüència des de les obtingudes en línia (fonamentalment cabal i oxigen dissolt) i les obtenibles a partir de laboratori que presenten freqüències de l'ordre de dies.
- Pel que fa a la seva utilització en el procés de simulació de les estacions, les primeres presenten problemes pel que fa al soroll associat als senyals, del que es conclou la necessitat d'aplicar eines eficients de filtrat de senyals. Pel que fa a les segones solen ser insuficients per a una correcta calibració d'un model dinàmic (la qual cosa implica habitualment la necessitat de dur a terme campanyes experimentals específiques)
- L'aplicació dels models implementats en el software GPS-X implica un estudi previ de la planta per tal d'escollir els subprocessos més adequats, així com la biblioteca que els implementa.
- De l'estudi de diferents problemàtiques que es troben en el procés de redisseny i operació de plantes en funcionament, específicament nitrificant i desnitrificant, es conclou

- de l'estudi per a l'ampliació d'una EDAR d'una indústria alimentària es conclou, la relació de volum de reactor anaerobi / recirculació interna òptima per assolir que la concentració de nitrogen (NKT) a la sortida sigui inferior a 10 mg/l sota diferents condicions a l'entrada, determinades experimentalment. Així mateix es conclouen les condicions que es tindrien que produir (limitació dels pics d'amoni a l'entrada) per tal que es poguessin assolir aquests nivells amb les dades de disseny actuals.
- De l'estudi d'una planta que presenta importants problemes de funcionament per tal d'assolir els nivells de qualitat prefixats (especialment pel que fa als sòlids en suspensió) degut a problemes de nitrificació/desnitrificació descontrolada es conclou: que amb la modificació del decantador secundari i treballant a set points d'oxigen baixos, conjuntament amb edat cel·lular baixa, es pot millorar el problema, tot evitant la nitrificació, establint-se les condicions precises per assolir aquest objectiu. En cas que l'objectiu sigui aconseguir la N/D es necessari una ampliació de la planta, augmentant el volum del reactor biològic fins 700 m³. A és seria necessari l'establiment d'un conjunt de condicions i especificacions de treball, que s'han estudiat específicament (seqüenciació de les turbines amb una freqüència de 25 minuts aerobi, 35 minuts anaerobi).
- De l'estudi de una EDAR, que no assoleix els nivells de N/D previstos, tot i estar dissenyada per fer-ho, es conclou: que cal modificar l'entrada als reactors biològics, tot modificant l'esquema de distribució de flux per tal de disposar de la correcta recirculació interna que estableixi les condicions d'aport de nitrats i nitrits a la zona anaeròbia per aconseguir la desnitrificació. De l'avaluació d'utilitzar els decantadors primaris com a zones anòxiques es conclou que seria una bona alternativa, sempre i quan es pogués disposar d'una recirculació dels reactors aerobis a primaris i convertir el reactor biològic numero 2 en zona aeròbia.
- Finalment, de l'estudi d'una EDAR a la que es volia avaluar l'efecte d'un nou corrent en el seu funcionament, i l'impacte que tindria respecte al procés de N/D es conclou que el límit de cabal a acceptar del corrent estudiat és de 2500

m³/dia, a partir del qual ja no s'assolirien els límits de qualitat establerts per als elements del cicle del nitrogen, i que actualment s'assoleixen donat que la planta encara es troba lluny del límit de capacitat. De l'anàlisi del límit de capacitat de la planta pel que fa a un influent de les mateixes característiques que l'actual s'ha establert que fins a un cabal de 35000 m³/dia és possible la N/D de forma satisfactòria.

- De la revisió dels sistemes existents per al filtrat de senyals, es conclou que és interessant l'avaluació de les wavelets, com a eina per eliminar sorolls i determinar característiques de les variables determinables en línia a les EDAR, donada la seva capacitat per filtrat localment i per tant assolir nivells de filtrat elevats mantenint les característiques originals.
- De l'estudi de l'aplicació de les wavelets a diferents tipus de senyals obtingudes en processos biològics de depuració d'aigües residuals es conclou que es fa necessari en cada cas, avaluar quina és la millor funció de base, el nivell de descomposició o el mètode d'eliminació de coeficients.
- De l'aplicació del mètode de wavelets per determinar les característiques d'un procés respiromètric es conclou que la base més adequada són els splines 3:3, que permeten una interpretació més eficient del senyal original. En aquest cas, una escala proporciona ja una aproximació prou raonable per descriure el procés, apareixent en una escala dos, una pèrdua de resolució que dificulta la interpretació del senyal obtingut. Com a conclusió general d'aquest cas, es troba que el procés d'eliminació de coeficients distorsiona el senyal original.
- Quan s'ha estudiat el senyal que s'obté a partir del cabalímetre d'entrada a la depuradora de Tarragona, que proporciona informació cada minut, s'ha trobat que el senyal original presenta diferents patrons, en funció de pertorbacions a l'influent. Això proporciona un bon cas d'estudi per a l'avaluació de les wavelets.
- L'aplicació de les wavelets a aquest senyal permet concloure que quan no hi ha pertorbacions importants el millor comportament s'obté al nivell 6 de

resolució. En canvi quan l'entrada de la planta presenta una entrada brusca de cabal, el nivell de resolució 6 l'assimila a un comportament oscil·latori, mentre que els nivells inferiors permeten representar amb major fiabilitat les característiques del pic. Aquest comportament es repeteix en estudiar el cabal d'entrada al reactor biològic.

- En l'estudi de les concentracions d'oxigen dissolt al sí del reactor, i donat que presenten pics prou característics es conclou que les escales inferiors (fins un màxim de 4) són les que permeten una millor descripció del senyal, ja que nivells més elevats fan perdre informació al senyal.

- De l'estudi de les tècniques de modelització estudiades (tant les més caixa negra com les més mecanicistes) és conclou que la complexitat del procés de tractament biològic d'aigües residuals és pot descriure de forma prou raonable, tot i que encara queda lluny una descripció que es pugui considerar exacta, especialment tenint en compte la limitació de la informació disponible. És en aquest sentit que es considera que aquestes tècniques de modelització poden ser útils en les etapes de redisseny d'aquests processos, com s'ha pogut constatar en les interaccions mantingudes amb responsables d'aquestes instal·lacions amb els que s'ha treballat de forma coordinada en aquesta Tesi doctoral.

BIBLIOGRAFIA

10. BIBLIOGRAFIA.

Anastasios I. Stamou. "Modelling of oxidation ditches using an open channel flow 1-D advection-Dispersion equation and ASM1 process description" *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 36, No. 5, pp. 269-276 (1997).

C. Fronteau, W. Bauwens and P. A. Vanrolleghem. "Integrated modelling: comparisson of state variables, processes and parameters in sewer ans wastewater treatment plant models". *Wat. Sci. Tech.*, Vol.36, No 5, pp. 373-380 (1997).

G. G. Patry and I. Takács. " Settling of flocculent suspensions in secondary clarifiers". *Wat. Res.* Vol. 26, pp. 473-479 (1992).

H. Melcer, H. Monteith, M. Newbigging, S. G. Nutt and J.P. Stephenson. "Dynamic modelling of trace contanimant removal in a municipal sewage treatment plant". *Wat. Sci. Tech.*, Vol.21, Brighton, pp. 351-362 (1989).

J. Kappeler and W. Gujer. "Development of a mathematical model for aerobic bulking". *Wat. Sci. Tech.*, Vol.28, N° 2, pp. 303-310 (1994).

J. Kappeler and W. Gujer. "Verification and applications of a mathematical model for aerobic bulking". *Wat. Sci. Tech.*, Vol.28, N° 2, pp. 311-322 (1994).

Koen Grijspeerd, Peter Vanrolleghem and Willy Verstraete. "Selection of one-dimensional sedimentation: models for on-line use". *Wat. Sci. Tech.*, Vol.31, N° 2, pp. 193-204 (1995).

Libor Novák, Luis Larrea and Jiri Wanner. "Mathematical model for soluble carbonaceous substrate biosorption". *Wat. Sci. Tech.*, Vol.31, No. 2, pp. 67-77 (1995).

M. Henze, W. Gujer, T. Mino, T. Matsuo, M. C. Wentzel and G. Marais. "Wastewater and biomass characterization for the sludge model N° 2: biological phosphorus removal". *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 31, N° 2, pp.13-23. (1995).

M. Lebeskind, D. Schäpers, C. Bornemann, E.Brands, M. Freund and T. Rolfs. "Parameter determination and model fitting - two approaches for modelling processes in wastewater treatment plants". *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 34, No 5-6, pp. 27-33 (1996).

P. Paraskevas, G. Kolokithas and T. Lekkas. "A complete dynamic model of primary sedimentation". *Environmental Technology*, Vol. 14, pp. 1037-1046 (1993).

Paul Lessard and M. B. Bech. "Dynamic modeling of wastewater treatment processes". *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 25, N° 1 (1991).

R. Otterphol and M. Freund. "Dynamic models for clarifiers of activated sludge plants with dry and wet weather flows". *Wat. Sci. Tech.*, Vol.26, N° 5-6, pp. 1391-1400 (1992).

S. Isaacs, J. A. Hansen, K. Schmidt and M. Henze. "Examination of the activated sludge model N° 2 with an alternative process". *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 31, N° 2, pp. 55-66 (1995).

W. Gujer, M. Henze, T. Mino, T. Matsuo, M.C. Wentzel and G.v.R. Marais. "The activated sludge model No 2: biological phosphorus removal". *Wat. Sci. Tech.*, Vol.2, pp.1-12, (1995).

Zhigou Yuan, Peter A. Vanrolleghem and Ghislain C. Vansteenkiste. "Modeling error identification of activated sludge models". *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 36, N0 5, pp. 81-88 (1997).

M. Henze, W. Gujer, T. Mino, T. Matsuo, M.C. Wentzel and G.v.R. Marais. "Wastewater and biomass characterization for the activated sludge model No 2: biological phosphorus removal". *Wat. Sci. Tech.*, Vol.2, pp.13-24, (1995).

M. Henze, C.P.L. Grady Jr., W. Gujer, G.v.R. Marais and T. Matsuo. "Activated sludge model No.1". IAWPRC Task group on mathematical modelling and desing and operation of biological wastewater treatment. July (1986).

Hydromantis Inc. "GPS-X technical reference". Canada. (1997)

Nuria González Prelic and Sergio J. García Galán. "Uvi_Wave 3.0: Wavelets toolbox for use with Matlab". Grupo de teoría de la senyal. Universidad de Vigo. (<http://www.tsc.uvigo.es> - <ftp://ftp.tsc.uvigo.es>).

J. T. Y. Cheung and G. Stephanopoulos. "Representation of process trend - part II. The problem of scale and qualitative scaling". *Computers Chem. Engng.* Vol. 14, No 4/5, pp. 511-539. (1990).

B. R. Bakshi and G. Stephanopoulos. "Representation of process trend - part III. Multiscale extraction of trends from process data". *Computers Chem. Engng.* Vol. 18, No 4, pp. 267-302. (1994).

V. J. Barclay and R. F. Bonner. "Application of wavelet transforms to experimental spectra: smoothing, Denoising, and data set compression". *Anal. Chem.* Vol 69, pp. 78-90 (1997).